



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

MOŽNOSTI RECYKLACE V OBLASTI
TECHNOLOGIE PÍSKOVÉHO PÓROBETONU

POSSIBILITIES OF RECYCLING IN THE SAND AERATED CONCRETE
TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Kostura

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA,
CSc., MBA

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Patrik Kostura
Název	Možnosti recyklace v oblasti technologie pískového pórobetonu
Vedoucí práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Drochytka, R. et al.: Pórobeton. Brno: VUTIUM, 1999

Lach, V., Daňková, M.: Mikrostruktura stavebních látek, VUT v Brně, 1991

Knězek, J. Ekologické a ekonomické zpracování průmyslových odpadních materiálů. Výzkumný ústav stavebních hmot, 2012.

Bergmans, J. et al. Recycling of autoclaved aerated concrete in floor screeds: Sulfate leaching reduction by ettringite formation, Construction and Building Materials, Volume 111, 2016,

Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Při výrobě autoklávaného pórobetonu vzniká nezanedbatelný podíl pórobetonové drti jakožto odpadu výroby. Vzhledem k současným trendům je třeba na tento materiál nahlížet jako na potenciální surovinu nebo výrobek a docílit tak bezodpadové technologie výroby.

Cílem práce je navrhnout konkrétní způsoby využití drcené pórobetonové hmoty nejen zpět ve výrobě pórobetonu, ale také pro další druhy stavebních hmot.

1. Na základě rešeršní činnosti zhodnoťte zkušenosti s využitím drcené pórobetonové hmoty jako stavebního materiálu. Věnujte se především požadavkům na její vlastnosti pro dané způsoby použití, zkušenostem s její úpravou a omezujícími faktory.
2. Na základě rešeršní činnosti zhodnoťte zkušenosti s využitím drcené pórobetonové hmoty jako součástí surovinové směsi pro výrobu pórobetonu. Zaměřte se na způsoby úpravy, požadavky a limity technologie (surovinové, technologické).
3. Sestavte metodiku hodnocení pórobetonové drti pro její využití v konkrétních stavebních materiálech.
4. Sestavte metodiku postupu při zhodnocení maximálního podílu konkrétní pórobetonové drti v surovinové směsi pro výrobu pórobetonu.
5. S využitím sestavených metodik proveďte rozbor konkrétní drcené pórobetonové hmoty a posuďte možnosti jejího využití ve stavebních materiálech.
6. Navrhněte metodiku laboratorního testování pro ověření maximální využitelnosti drcené pórobetonové hmoty jako součástí surovinové směsi pro výrobu pórobetonu.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Odpadní pórobetonová drť vzniká buď přímo ve výrobně pórobetonu nebo až na stavbě. Možnosti, jak nakládat s pórobetonovou drtí jsou dvě. Buďto ji budeme řešit jako lehké kamenivo nebo jako surovinu pro výrobu pórobetonu.

Na základě fyzikálně-mechanických vlastností bylo rozhodnuto, že pórobetonová drť je jako lehké kamenivo vhodná. Drť jako lehké kamenivo byla testována ve dvou variantách jemnosti (0-2 mm, 0,25-2 mm).

Vyhodnocení drtě jako suroviny vhodné pro výrobu pórobetonu spočívalo ve vytvoření laboratorně autoklávovaných kompozitů. Drť byla testována v různých poměrech (10%, 20%, 30%, 40%), dvou variantách jemnosti (0-2 mm, 0-0,25 mm) a ve dvou recepturách (vápenná báze, příměs fluidního popílků). Nahrazován byl křemičitý písek. Na základě fyzikálně-mechanických vlastností a mikrostrukturálního rozboru (XRD, SEM) bylo vyhodnoceno, že pórobetonová drť je jako surovina vhodná i při 40% náhradě písku.

KLÍČOVÉ SLOVA

Pórobetonová drť, fluidní popílek, vápno, křemičitý písek, autoklávovaný pórobeton, lehké kamenivo, autoklávování, RTG difrakční analýza, tobermorit, recyklace.

ABSTRACT

Waste of the aerated concrete is generated directly from the production of aerated concrete or from the constructions. The options for handling aerated concrete are two. We can deal with it as a light aggregate or as a material for the production of aerated concrete.

Based on the physico-mechanical properties, the decision was made that aerated concrete is suitable as a light aggregate. The brash as a light aggregate was tested in two variants of the softness (0-2 mm, 0.25-2 mm).

Evaluation of the brash as a suitable material for the production of aerated concrete consisted of the creation of laboratory-autoclaved composites. The brash was tested in different ratios (10%, 20%, 30%, 40%), two variants of fineness (0-2 mm, 0-0.25 mm) and two formulations (lime base, fluffy fly ash). Siliceous sand was replaced. Based on physico-mechanical properties and microstructural analysis (XRD, SEM), was found that aerated concrete as a material is suitable for 40% sand substitution.

KEY WORDS

Aerated concrete brash, fluid fly ash, lime, siliceous sand, autoclaved aerated concrete, light aggregate, autoclaving, RTG diffraction analysis, tobermorite, recycling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Patrik Kostura *Možnosti recyklace v oblasti technologie pískového pórobetonu*. Brno, 2017. 79 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2017

Patrik Kostura

autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 26. 5. 2017

Patrik Kostura

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce prof. Ing. Rostislavovi Drochytkoví CSc. MBA za cenné rady a pomoc při řešení bakalářské práce, také Ing. Vítovi Černému Ph.D. a Ing. Šárce Keprdové Ph.D. za pomoc s vypracováním práce. Bakalářská práce byla zpracována při řešení projektu MPO FV10284 „Pokročilá technologie pískového pórobetonu s podílem druhotných surovin a efektivnějším využitím přírodních zdrojů“.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	TEORETICKÁ ČÁST	12
3	TECHNOLOGIE PÓROBETONU - OBECNĚ	13
3.1	<i>Základní suroviny</i>	<i>13</i>
3.1.1	Maltoviny	13
3.1.2	Křemičité látky	15
3.1.3	Plynotvorné látky	16
3.1.4	Pomocné suroviny	16
3.1.5	Voda	17
3.2	<i>Postup výroby</i>	<i>17</i>
3.2.1	Proces autoklávování	18
3.2.2	Tvorba struktury pórobetonu	19
4	VZNIK TOBERMORITU	20
4.1	<i>Vliv křemičitých surovin</i>	<i>21</i>
4.2	<i>Vliv doby a teploty hydrotermálních reakcí</i>	<i>22</i>
5	VYUŽITÍ ODPADNÍHO PÓROBETONU	23
5.1	<i>Druhy lehkých kameniv</i>	<i>23</i>
5.1.1	Popílkový agloporit	24
5.1.2	Keramzit	25
5.1.3	Expandovaný Perlit	27
5.1.4	Cihelná drť a cihloporit	28
5.1.5	Pórobetonová drť	29
5.2	<i>Další možnosti využití odpadního pórobetonu</i>	<i>30</i>
5.2.1	Čištění odpadních vod	30
5.2.2	Podlahové potěry	32
5.2.3	Alternativní výplňový materiál v gumárenském průmyslu	34
5.2.4	Zelené střechy	36
5.2.5	Lehčené plnivo do propustného betonu	38
5.2.6	Kamenivo do lehkého geopolymerního betonu	40
6	CÍL PRÁCE	43

7	PRAKTICKÁ ČÁST	44
8	METODIKA PRÁCE.....	44
8.1	<i>Použité metody a postupy.....</i>	46
9	ETAPA I – ROZBOR PÓROBETONOVÉ DRTI.....	52
9.1	<i>Komparace vlastností drtě s komerčními kamenivý.....</i>	54
10	ETAPA II – ROZBOR SUROVIN A PŘÍPRAVA VZORKŮ	55
10.1	<i>Chemický rozbor</i>	55
10.2	<i>Receptury.....</i>	56
10.3	<i>Postup výroby</i>	56
11	ETAPA III – ANALÝZA VZORKŮ	58
11.1	<i>Fyzikálně-mechanické vlastnosti</i>	58
11.1.1	<i>Objemová hmotnost</i>	58
11.1.2	<i>Pevnost v tlaku.....</i>	61
11.2	<i>Mikrostruktura testovaných kompozitů</i>	62
11.2.1	<i>XRD analýza.....</i>	62
11.2.2	<i>Elektronová mikroskopie</i>	68
12	ZÁVĚR.....	72
13	SEZNAM LITERATURY	74
14	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	76
15	SEZNAM TABULEK	78
16	SEZNAM GRAFŮ	79
17	SEZNAM RENTGENOGRAMŮ	79
18	SEZNAM ZKRATEK.....	80

1 ÚVOD

Stavebnictví v dnešní době tvoří celosvětově 20 % odpadů. Odhaduje se, že na jednoho obyvatele připadá 0,6-1,0 tun stavebního odpadu ročně. Význam recyklace tedy vzrůstá stále častěji je tedy snaha využívat odpadní materiál znovu ve výrobě. Důvod není jen ekologický, ale také ekonomický. Ve výrobě pórobetonu mohou vznikat po procesu autoklávování zmetky. Tato práce se věnuje možnostem využití autoklávované pórobetonové drti jako druhotné suroviny. [19]

Odpadní pórobetonová drť vzniká především:

- Ve výrobním závodě. Kde po procesu autoklávování mohou kvůli nedodržení postupu výroby, špatnou recepturou, odlišnou kvalitou vstupních surovin, nebo následnou špatnou manipulací s výrobky vznikat vadné kusy. Vzniká tak odpad, který již nelze tak jednoduše opětovně použít ve výrobě.
- Při budování nových staveb nebo demolicích staveb starších.

Hledají se tedy další možné způsoby využití pro pórobetonovou drť nejen ve výrobě pórobetonu, ale také jinde jako stavební či jiný materiál. Především z ekonomického hlediska může být nahrazování některých vstupních surovin ve výrobě pórobetonu zajímavé. Nejdražší složkou výroby pórobetonu je cement a křemičitý písek. Při obrovském množství surovin, které jsou spotřebovávány a rostoucímu objemu výroby může být i malé množství náhrady pórobetonovou drtí výhodné. Zároveň z ekologického hlediska dochází k šetření neobnovitelných zdrojů a současné likvidaci odpadu. Tím se snižuje negativní dopad lidské činnosti na životní prostředí.

2 TEORETICKÁ ČÁST

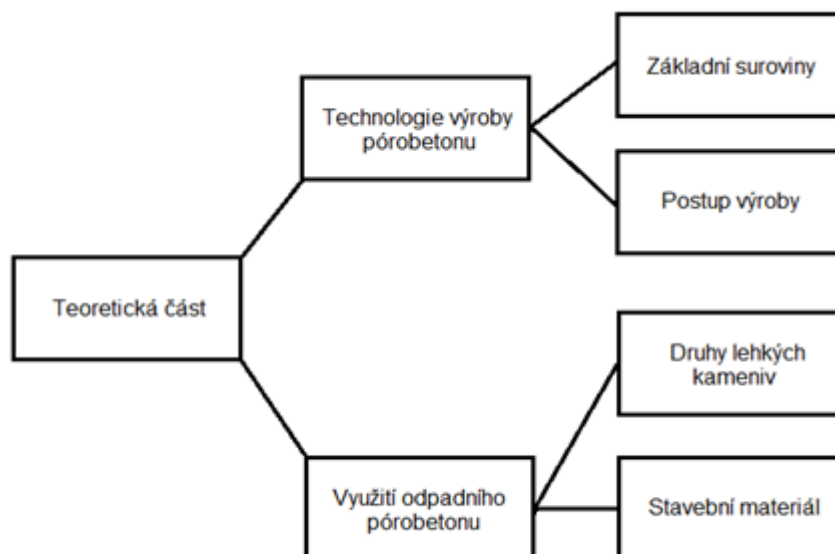
Teoretická část je rozdělena do dvou bloků. V první části bude pozornost věnována obecně technologii výroby pórobetonu, vstupním surovinám a procesu autoklávování.

Druhá část bakalářské práce se zabývá obecně lehčenými umělými kamenivý a využitím odpadního pórobetonu v jiných stavebních odvětvích.

Praktická část je zaměřena na dvě hlavní možnosti využití odpadního pórobetonu:

První možností je tedy využít drcený pórobeton jako stavební materiál. Pro tuto variantu je nutné rozdělit pórobetonovou drť do několika frakcí s ohledem na vlastnosti a druh materiálu, kde bude drť použita.

Jako druhá možnost se nabízí použití drceného pórobetonu jako součást surovinové směsi (bezodpadová výroba). Zde je potřeba sledovat způsob úpravy a následné změny vlastností pórobetonu po přidání pórobetonové drti. Z části je řešen i vznik tobermoritu a vlivy, které jeho vznik ovlivňují.



Obrázek 1 - Schéma postupu přípravy teoretické části

3 TECHNOLOGIE PÓROBETONU - OBECNĚ

Pórobeton je přímo lehčený anorganický kompozitní materiál. Makropóry jsou uzavřené a mohou tvořit až 80 % celkového objemu. Pórobeton patří do skupiny přímo lehčených betonů, je to speciální druh betonu, jehož objemová hmotnost je menší než $2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Podle použitého plniva ještě lze pórobeton rozdělit na bílý a šedý. Ve výrobě bílého pórobetonu je jako plnivo použitý jemně mletý křemičitý písek, méně častou variantou je v dnešní době šedý pórobeton kde se jako plnivo používá popílek.

Tabulka 1 - Rozdělení betonů podle objemové hmotnosti a jejich použití [3]

Název	Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Použití
Obyčejný	2000 - 2600	konstrukční a výplňové betony
Lehký	< 2000	izolační, izolační a nosné betony, výplňové betony
Těžký	> 2600	betony se speciální izolační funkcí

V současnosti existuje pět technologií výroby pórobetonu: UNIPOL, CALSILOX, SIPOREX, HEBEL, YTONG. V ČR jsou dvě z těchto technologií – UNIPOL a CALSILOX. [1, 2]

3.1 Základní suroviny

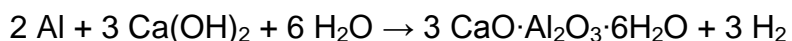
Surovinové složení pro výrobu pórobetonu má 4 základní druhy surovin, ke kterým se přidává voda. Jsou to maltoviny (pojiva), křemičité látky (plniva), plynotvorné látky, pomocné suroviny. [1]

3.1.1 Maltoviny

Maltoviny mají v pórobetonu funkci pojiva. Jako pojivo se při výrobě používá cement nebo vápno, podle toho jaká složka je převládá lze rozdělit pórobeton na plynobetony (převládající složkou je cement) a plynosilikáty (převládající složkou je vápno). Maltoviny jako vápenný hydrát a vysokopecní struska mohou sloužit jako částečná náhrada pojiva. [2]

- **Vápno**

Vápno je technický název pro CaO, kde hlavní mineralogickou složkou je kalcit – trigonální CaCO₃. Pálené vápno pro výrobu pórobetonu se musí používat vzdušné, co nejčerstvější, čisté a nehašené. Použití nehašeného vápna umožňuje využití jeho hydratačního tepla ve výrobním procesu. Další důvod použití vápna je patrný z popisu následující chemické reakce, kdy se hydroxid vápenatý podílí na tvorbě vodíku (nakypřování směsi):



Vápno se účastní i hydrotermálních reakcí při autoklávování, a v neposlední řadě snižuje riziko sedimentace směsi.

Jakost vápna je u nás předepsána technickou podmínkou ČSN EN 459-2 „Vápno pro výrobu pórobetonů“. [1, 4]

Tabulka 2 - Požadavky na vápno vhodné pro výrobu pórobetonu [1]

Požadavek	Hodnota		Jednotka
	minimum	maximum	
Obsah nerozhasitelných součástí	-	12	% hmotnostních
Celkový obsah CaO	90	-	% hmotnostních
Obsah MgO	-	3	% hmotnostních
Obsah siřičové síry	-	0,2	% hmotnostních
Ztráta žíháním *	3	6	% hmotnostních
Rychlost hašení vápna	4	12	minut
Teplota hašení	60	-	°C

* z toho obsah H₂O nesmí být větší než 3 % (tomu odpovídá obsah Ca(OH)₂ max. 12,3 %) a obsah CO₂ nesmí být větší než 5 % (tomu odpovídá obsah CaCO₃ max. 11,4 %)

- **Vápenný hydrát**

Vápenný hydrát se používá jen jako alkalitu zvyšující přísada k cementu. Zvětšuje účinek plynotvorných látek a snižuje riziko sedimentace dalších složek. Musí vyhovovat požadavkům ČSN P ENV 459-1 „Stavební vápno. Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody“. [1]

- **Cement**

Pro výrobu pórobetonu se používají cementy na bázi portlandského slínku (CEM I) třída 32,5 R nebo 42,5 R. Cement se používá pro rychlejší náběh počátečních pevností. [1]

- **Vysokopecní struska**

Struska se používá pro úsporu maltovin. Musí být zásaditá, granulovaná a splňovat stejná kritéria, která žádáme pro strusku určenou na semílání do cementu. Všeobecné požadavky na chemické složení uvádí norma ČSN 72 2030-1. [1, 5]

3.1.2 Křemičité látky

Křemičité látky tvoří plnivo. Při autoklávování se ale zapojují do chemické reakce s maltovinou. Jejich jakost je pro autoklávovaný pórobeton velmi důležitá. Největším zástupcem je křemičitý písek, čím dál méně se využívá popílek. [1, 2]

- **Křemičitý písek**

V ČR se používají písky váté a písky odpadající při plavení kaolinu. Mohou se ale používat i různé písky říční, pískovcové a jiné. Ve výrobě je třeba písek domílat pro zvětšení specifického povrchu na min. 200 m²/kg, čímž se zintenzivní hydrotermální reakce.

Tabulka 3 - Požadavky na křemičitý písek pro výrobu pórobetonu [1]

Požadavek	Hodnota		Jednotka
	minimum	maximum	
Obsah SiO ₂	90	-	% hmotnostních
Obsah alkálií K ₂ O + Na ₂ O *	-	1,5	% hmotnostních
Jílovitost písku	-	3	% hmotnostních

* z toho dle ČSN 73 1358-1 obsah ve vodě rozpustného Na₂O má být max. 0,2 %, jinak obsah slídy nemá překročit 0,5 %. [1]

- **Popílek**

Vysokoteplotní popílký ze spalování uhlí se vyznačují vysokou chemickou aktivitou, která souvisí s jejich sklovitou fází bohatou na oxid křemičitý. [1]

Tabulka 4 - Požadavky na popílek pro výrobu pórobetonu [1]

Požadavek	Hodnota		Jednotka
	minimum	maximum	
Obsah SiO ₂	45	-	% hmotnostních
Ztráta žháním	-	7	% hmotnostních
Celková síra jako SO ₃	-	0,2	% hmotnostních
MgO	-	2	% hmotnostních
Al ₂ O ₃	-	35	% hmotnostních
Fe ₂ O ₃	-	18	% hmotnostních

3.1.3 Plynotvorné látky

Plynotvorné látky se používají pro nakypření směsi. Částečně také zabraňují sedimentaci směsi. Nejjakostnější plynotvorné látky jsou ty, které jsou nejjemnější nebo v pórobetonové směsi nejvíce rozptylují (popřípadě rozpouštějí), díky čemuž poté vytvářejí četné, rovnoměrné a relativně malé póry. Mezi plynotvorné látky řadíme: prášek z některých kovů (nejčastěji hliník), chlorové vápno, močovinu a karbid. [6]

- **Hliníkový prášek**

Hlinitanový prášek velmi snadno oxiduje, aby nedošlo k explozi, přidává se nejčastěji minerální olej, který téká až od 200 °C. K odmaštění prášku se používají tenzidy (mazlavé mýdlo). Dávkování je nejčastěji 0,3 kg Al/m³. Prášek by se měl skládat ze zcela rovnoměrně velkých stříbrnošedých částic šupinového tvaru. [1]

Tabulka 5 - Požadavky na Al - prášek pro výrobu pórobetonu [1]

Požadavek	Hodnota		Jednotka
	minimum	maximum	
Obsah aktivního hliníku	94	-	% hmotnostních
Obsah tuku	-	1,3	% hmotnostních
Vlhkost prášku	-	0,2	% hmotnostních
Specifický povrch	700	1200	m ² ·kg ⁻¹

3.1.4 Pomocné suroviny

Pomocné suroviny slouží k usnadnění technologického procesu, nebo ke zlepšení konečných vlastností výrobku. [1]

- **Sádrovec**

Sádrovec zlepšuje pevnosti výrobků. Reguluje tuhnutí směsi, tak že zpomaluje průběh hašení vápna. Jako elektrolyt podporuje vznik tixotropní soustavy. [1]

- **Sádra, anhydrit**

Sádra se používá k regulaci časového průběhu tuhnutí autoklávované směsi, tak aby odpovídala naplyňovací reakci Al – prášku. Zlepšuje jakost pórobetonu. [1]

- **Klih**

Stabilizuje pórobetonovou směs. [1]

- **Krystalizační zárodky**

Zkracují dobu autoklávování a zlepšují pevnosti autiklávovaných výrobků. [1]

- **Přerostový kal**

Upravuje hustotu směsi v míchačce a obsahuje krystalizační zárodky. [1]

3.1.5 Voda

Jakost vody je dána normou ČSN 73 2010 „Složení betonové směsi.“ Nejlepší je voda pitná, která má nízký obsah chloridů a přibližně neutrální reakci. Voda se ohřívá na teplotu 35 – 59 ° C.

3.2 Postup výroby

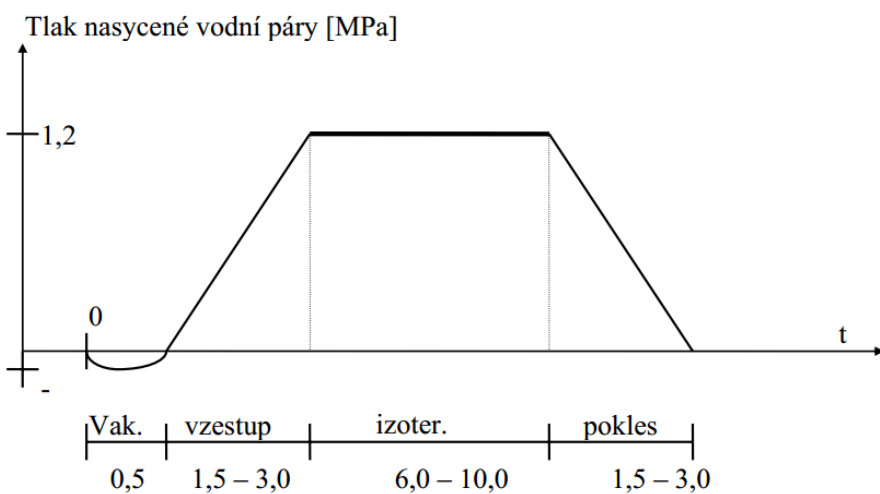
Obecný postup výroby spočívá buď to v odděleném nebo společném velmi jemném mletí (za sucha, za mokra), mísení a homogenizaci křemičitých látek s páleným vápnem nebo i cementem, popřípadě jinými přísadami. Výsledná směs se rozmísí s vodou, přerostovým kalem a plynotvornou látkou na tekutou kaši, která se vlije do forem. Následuje zrání hmoty, kde nejdříve proběhne nakypření – kynutí a pak zatuhnutí. Poté se seříznou přerosty a podle potřeby rozřeže hmota na potřebné tvary. Podle druhu technologie proběhne proces autoklávování buď ve formách, lamelách, nebo na roštích, podložkách anebo bočnicích. Po skončení

autoklávování se výrobky nechají proschnout, následuje balení a expedice k zákazníkům. [1, 2]

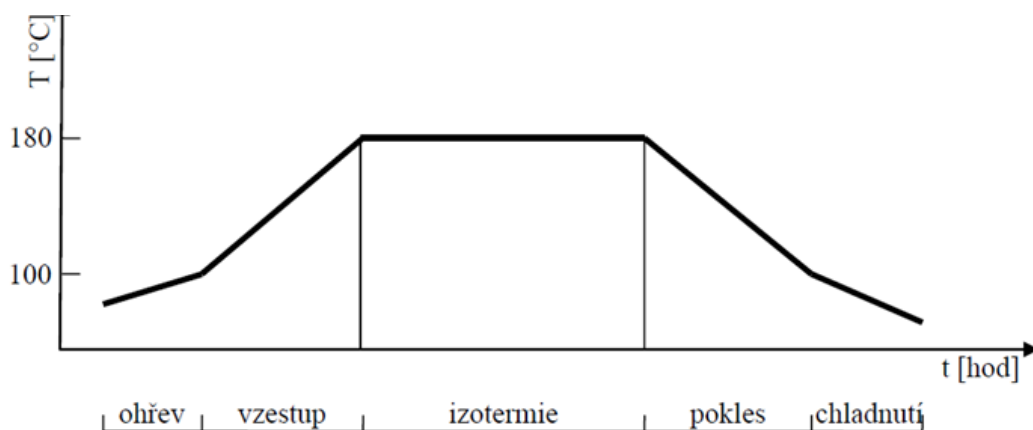
3.2.1 Proces autoklávování

Proces autoklávování můžeme rozdělit do čtyř fází:

1. vakuování
2. vzestup
3. výdrž (izotermie)
4. pokles (přepouštění)



Obrázek 2 - Grafické znázornění fází technologie autoklávování (změny tlaku) [1]



Obrázek 3 - Grafické znázornění technologie autoklávování (změny teploty) [1]

Stádium 1 – probíhá vakuování a posléze vyhřívání výrobků nasycenou parou do 100 °C. Je důležité, aby se materiál prohříval stejnoměrně (vyloučí se škodlivá vnitřní napětí). Pro dosažení stejnoměrného ohřevu se provádí dva možné zásahy:

odstranění vzduchu z autoklávu (vakuováním), vložením výrobků s nejvyšší možnou teplotou.

Stádium 2 – probíhá prohřívání výrobků nasycenou parou o teplotě nad 100 °C. Rychlost vyhřívání závisí hlavně na povrchovém modulu výrobků. Z ekonomického hlediska je výhodné využívat v prvním období nasycenou páru z jiného autoklávu, který je ve stádiu snižování tlaku.

Stádium 3 – probíhá udržování teploty prostředí nasycené vodní páry na konstantní provozní teplotě (izotermický ohřev). Dochází k reakci mezi SiO_2 a Ca(OH)_2 . Potřebná doba stádia tří se odvíjí od: množství vápna ve směsi, na konzistenci, provozní teplotě a tlaku a na požadavcích na minimální pevnosti konečných výrobků. V praxi je nejčastější provozní tlak 0,8 - 1,3 MPa což odpovídá teplotě 174 - 190,7 °C. Hlídat se musí přítomnost přepáleného CaO nebo MgO, které se dodatečně roztahují a zvětšují svůj objem. Způsobují odprýskávání povrchových vrstev.

Stádium 4 – probíhá snižování provozního tlaku v autoklávu až na hodnotu 0,12 MPa. Toto stádium musí být pozvolné, pokud by ochlazování bylo rychlejší než 1 °C/min, dochází ve výrobku ke vzniku termických trhlin a tím ke snižování pevností výrobků.

Stádium 5 – probíhá vypouštění (přepouštění páry) zbytku tlaku a chladnutí výrobků v atmosférickém tlaku. Stádium probíhá jak při uzavření autoklávu, tak i po jeho otevření. [7]

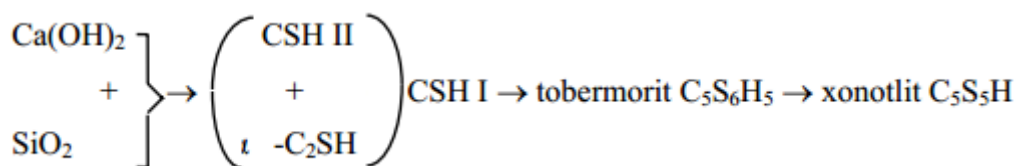
3.2.2 Tvorba struktury pórobetonu

Po zamíchání vstupních surovin probíhají za vzniku struktury pórobetonu dva děje. V prvním ději reaguje hliník s hydroxidem vápenatým a vzniká nakypřování hmoty. Druhým dějem je tuhnutí směsi za vzniku CSH produktů a tixotropní struktury. Výsledných pevností dosahuje produkt až vytvrzováním v autoklávu.

Průběh a výsledek hydrotermálních reakcí je závislý na řadě faktorů:

1. Chemický charakter výchozích látek (reaktivitě příslušného SiO_2)
2. Fyzikální struktura výchozích látek
3. Specifický povrch výchozích látek
4. Poměr $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ ve výchozí surovinové směsi
5. Množství záměsové vody
6. Druh aditiv
7. Době trvání hypotermické reakce

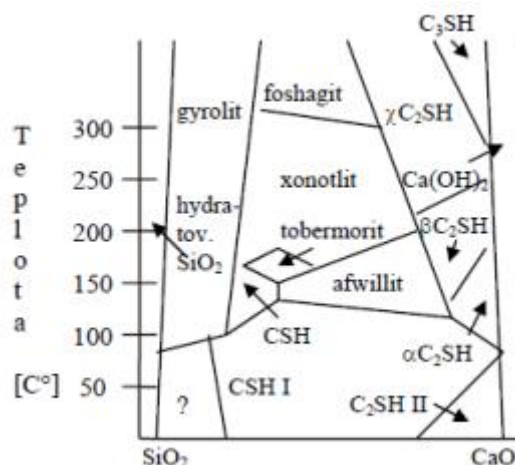
Jako hlavní nositel pevnosti pórobetonu je považován tobermorit. Tvoří převážně destičkové (lístčkové nebo laťkové) krystaly o velikosti přibližně $1 \mu\text{m}$ a poměrem $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 0,8 - 1,0$. Chemický vzorec tobermoritu je $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$. Při hydrotermální reakci se tvoří nejdříve CSH II a určité množství CaO . Ty se dále přeměňují se zbylou nezreagovanou křemičitou surovinou na CSH I, který má obsah CaO nižší. Dalším autoklávováním vzniká tobermorit. [8]



Obrázek 4 - Rovnice vzniku tobermoritu [1]

4 VZNIK TOBERMORITU

Zásadní vlastností pro vznik tobermoritu a veškerých CSH fází je molární poměr CaO/SiO_2 a teplota hydrotermálních procesů. Některé počáteční fáze jako například tvorba CSH I (při hydrataci cementu) mohou vznikat i při běžných atmosférických podmínkách. Jsou to fáze strukturou podobné tobermoritu, jejich krystalická mřížka není ale ani zdaleka tak vyvinutá. Při splnění dané teploty autoklávování a molárního poměru vzniká tobermorit, který je pouze přechodnou fází, protože následně krystalizuje na xonotlit, který z důvodu nižších pevností není požadován. Je proto důležité stanovit i dobu autoklávovacího cyklu tak, aby vznikalo maximální množství tobermoritu a xonotlit nevznikal. Existenční oblasti kalciumhydrosilikátů v závislosti na teplotě a molárním poměru jsou vidět na následujícím obrázku. [1]



Obrázek 5 - Fázový diagram CaO – SiO₂ – H₂O dle Besseye [1]

4.1 Vliv křemičitých surovin

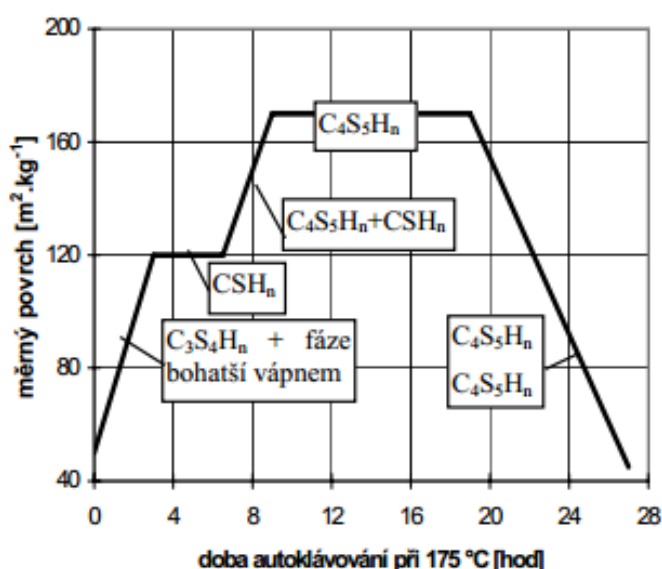
První ze čtyř nejdůležitějších aspektů ovlivňujících vznik tobermoritu, je charakter vstupní křemičité suroviny. Hlavní vlastností je jejich mineralogický charakter, amorfní či krystalická forma suroviny, kdy se mění jejich schopnost rozpouštět se do roztoku a tvořit Si⁴⁺ ionty. Důležitý je také měrný povrch, kdy je schopnost uvolňování do roztoku úměrná velikosti povrchu látky. [18]

Charakter křemičité látky nejvíce ovlivňuje vlastnosti vzniklých CSH gelů. Při použití krystalického křemene, ve formě křemičitého písku, vznikají gely o molárním poměru C/S ≈ 1,69, to znamená, že jsou bohaté na vápník. Tyto gely se vyznačují kratšími řetězci. Naopak použitím amorfního křemene vznikají gely s molárním poměrem C/S ≈ 0,81, to znamená, že jsou bohaté na křemík. Mají delší řetězce, které hůře krystalizují. [18]

Příměs amorfního křemičitanu ve formě popílku může urychlit tvorbu tobermoritu, v konečném důsledku ho ale vznikne méně. To vede ke snižování pevností výsledného vzorku, společně se snižováním objemové hmotnosti. Nezreagované částice popílku mohou také zvýšit nasákavost a smrštění. [18]

4.2 Vliv doby a teploty hydrotermálních reakcí

V průběhu hydrotermální syntézy nastává rekrytalizace ve smyslu Rebinděrovy teorie. Po konci hydratace CaO a tím vytvoření prostorové makrostruktury z krystalů $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nastává počátek krystalizace. Kdy v průběhu hydrotermální syntézy pórobetonů dochází potom až k několikanásobné přeměně krystalických fází, bez toho abychom dosáhli rovnovážného stavu. S přeměnou krystalických fází je spojen i tento jev, kdy se specifický povrch hydratačních produktů při delší době trvání hydrotermálních reakcí zmenšuje, tedy že se zvětšují individuální krystalky. Tento děj se odehrává převážně po více než 20 hodinách autoklávování. [1]



Obrázek 6 - Vztah mezi měrným povrchem hydratačních produktů a dobou hydrotermální reakce [1]

Prodloužení doby izotermické výdrže má za důsledek zlepšení mechanických vlastností a mineralogického složení. Delší hydrotermální ošetřování umožňuje lepší krystalizaci tobermoritu, po které jsou jeho krystalky větší a lépe do sebe zapadají. Díky tomu se vytváří celistvější mikrostruktura, díky které se zlepšují mechanické vlastnosti pórobetonu.

Naopak negativní vliv nastává při izotermické výdrži přes 20-72 hodin. Kdy při dostatku CaO může vznikat xonotlit, který snižuje pevnost pórobetonu. Dále pokud zvýšíme tlak autoklávování, může dojít k porušení krystalů, čímž se opět sníží konečná pevnost pórobetonu. [18]

5 VYUŽITÍ ODPADNÍHO PÓROBETONU

Odpadní pórobeton vzniká na stavbě, nebo přímo ve výrobě jako vadný kus. Ve výrobě pórobetonu, vznikají zmetky jako důsledek špatné receptury nebo nedodržení správného postupu autoklávování. Mimo výrobu se s odpadním pórobetonem setkáme na demolicích nebo stavbách.

Z ekonomického hlediska je snaha tento odpad dále využívat. V případě odpadu z výroby jako součást surovinové směsi. Odpadní pórobeton z demolic a staveb by se podrcený použil jako stavební materiál.

Možnosti využití drceného pórobetonu:

- Lehké kamenivo do betonu
- Čištění odpadních vod
- Podlahové potěry
- Alternativní výplňový materiál v gumárenském průmyslu
- Zelené střechy
- Lehčené plnivo do propustného betonu
- Kamenivo do lehkého geopolymerního betonu
- Součást surovinové směsi ve výrobě pórobeton

5.1 Druhy lehkých kameniv

Lehká kameniva se ve stavebnictví využívají již od středověku. Hlavním důvodem použití lehkých kameniv je snaha získat co nejmenší objemovou hmotnost při zachování poměrně velkých pevností.

Zmenšení hmotnosti staviv může probíhat třemi způsoby:

- **Přímo** – vnášení dutin do cementové matrice (póry z plynu nebo pěny). Pórobetony, plynobetony. Výhodou je homogenní struktura a stejné vlastnosti ve hmotě.
- **Nepřímo** – pórovité kamenivo je obaleno tuhým tmelem. Dělí se na anorganické (přírodní a umělé) a organické (přírodní a umělé). Nevýhodou je vznik tepelných mostů ve hmotě, nehomogenní struktura a rozdílné vlastnosti pojiva a plniva.
- **Kombinovaně** – kombinace obou výše uvedených.

5.1.1 Popílkový agloporit

Agloporit je vyráběný slinováním a následným krátkodobým výpalem, především na aglomeračních roštích. Nejčastější používané suroviny jsou odpadní materiály z energetického, hutního nebo jiného průmyslu.

Popílkový agloporit je umělé pórovité kamenivo vytvářené sbalkováním létavých popílků (vzniklých ze spalování černého nebo hnědého uhlí), které se následně spékají na aglomeračních roštích. [7]



Obrázek 7 - Řez zrnem agloporitu [20]



Obrázek 8 - Agloporit frakce 8/16 [20]

Průměr granulačních talířů bývá větší než 1,5 m. Sklonem talíře se reguluje velikost granálií (čím větší sklon, tím menší jsou sbalky). Pro výrobu sbalků o průměru 10 – 20 mm je sklon asi 45°.

Dále se dá velikost sbalků ovlivnit:

- rychlostí otáček talíře (nejčastěji 12 – 18 otáček za minutu)
- množstvím materiálu (čím více materiálu vsypeme, tím menší sbalky vytvoříme)
- přívodem vody (čím větší kapky, tím jsou větší i sbalky)

Následuje rychlé sušení a výpal sbalků. Přičemž se dává pozor, aby nedošlo k porušení sbalků při odpařování vody. [7]

Tabulka 6 - Požadavky na agloporit [7]

Požadavek	Hodnota		Jednotka
	minimum	maximum	
Pórovitost	45	60	%
Mezerovitost	50	60	%
Objemová hmotnost (agloporitový písek)	600	1050	kg·m ⁻³
Objemová hmotnost (agloporitový štěrk)	400	700	kg·m ⁻³
Objemová hmotnost (netříděný)	800	1350	kg·m ⁻³
Nasákavost	8	30	% hmotnostních
Součinitel tepelné vodivosti (volně sypaný)	0,12	0,16	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Odolnost drcení	2	8	MPa
Sypná hmotnost (frakce 0-4 mm)	700	900	kg·m ⁻³
Sypná hmotnost (frakce 4-8 mm)	600	800	kg·m ⁻³
Sypná hmotnost (frakce 8-16 mm)	550	800	kg·m ⁻³
Sypná hmotnost (frakce 16-22 mm)	550	800	kg·m ⁻³

5.1.2 Keramzit

Keramzit je pórovité zakulacené kamenivo z lehce tavitelných hlín. Vytváří se tepelným expandováním hlín vhodného mineralogického a chemického složení. Expanzi způsobují oxidačně-redukční reakce. Póry vznikají při výpalu 1100 – 1200 °C. Při výrobě keramzitu se využívá nadýmání cihlářských hlín.

Hlína vhodná pro nadýmání musí splňovat 3 podmínky:

1. Při vhodném žáru se musí na povrchu natavit tolik látky, aby se zaplnily povrchové póry, a tím se zabránilo unikání plynů tvořících se uvnitř.
2. Viskozita uvnitř materiálu musí být dostatečně vysoká, aby propouštění plynu zůstalo omezeno (nedocházelo ke spojování jednotlivých bublin plynu). Tento stav označujeme jako pyroplastický.
3. V surovině se musí vyskytovat taková látka nebo směs látek, které uvolní plyny v době kdy je povrch kompaktní a uvnitř materiálu je pyroplastický stav. [7]



Obrázek 9 - Řez zrnem keramzitu [21]



Obrázek 10 – Liapor frakce 4/8 [22]

Pro frakci nad 4 mm se používá cihlářský lis, menší frakce se vytváří na sbalovacím talíři. Cihlářským lisem se protlačí plastické těsto (síto má různá oka). Vznikají válečky, které se zaprašují suchou žáruvzdornou zeminou, aby se při dalším zpracování neslepovali nebo nestavovali. Odřezávání se provádí rotačním drátěným odřezávačem připojeným k ústí lisu. Kulový tvar (průměr 6 – 20 mm) získávají válečky z části v rotačním bubnu, hlavně ale v peci při samotném výpalu. Rotační pece jsou krátké a teplota je 1100 až 1250 °C.

U nás se keramzit nejčastěji prodává pod obchodní značkou Liapor. Firma LIAS a.s. Vintířov. [7]

Tabulka 7 - Požadavky na keramzit [7]

Požadavek	Hodnota		Jednotka
	minimum	maximum	
Mezerovitost	40	45	%
Objemová hmotnost (volně sypaný)	300	700	kg·m ⁻³
Objemová hmotnost (nejčastěji)	500	650	kg·m ⁻³
Objemová hmotnost (Vintířov 0-4 mm) průměr	651		kg·m ⁻³
Objemová hmotnost (Vintířov 4-16 mm) průměr	504		kg·m ⁻³
Objemová hmotnost (Vintířov 16-22 mm) průměr	450		kg·m ⁻³
Nasákavost	10	20	% hmotnostních
Nasákavost (u hrubých frakcí)	17	20	% hmotnostních
Odolnost drcení	2,8	4	MPa
Sypná hmotnost (frakce 0-4 mm) Vintířov	480	900	kg·m ⁻³
Sypná hmotnost (frakce 4-8 mm) Vintířov	350	550	kg·m ⁻³
Sypná hmotnost (frakce 8-16 mm) Vintířov	300	500	kg·m ⁻³
Sypná hmotnost (frakce 16-22 mm) Vintířov	280	430	kg·m ⁻³

5.1.3 Expandovaný Perlit

Perlit je hornina sopečného původu zatuhlá jako sklo. Jde o horninu, u které se při ochlazování tak rychle zvětšila viskozita lávy, že nemohla nastat žádná krystalizace ani unikání vody (4 – 5 %). Zahřátí suroviny do pyroklastického stavu a zároveň tvořící se vodní pára způsobí nadýmání, které je přímo závislé na množství tzv. aktivní vody a způsobu jejich vazby. [7]



Obrázek 11 - Perlit jako kámen, drcený a následně expandovaný [23]



Obrázek 12 - Expandovaný perlit [23]

Perlit se získává nejčastěji povrchovou těžbou. Následuje předrcení a rozdělení suroviny do jednotlivých frakcí (nejčastěji 0-2 mm, 4-6 mm). Upravená zrnitá surovina se účinkem vysokých teplot 900 – 1300 °C za poměrně krátkou dobu (do 10 sec.) expanduje, přičemž mnohonásobně zvětší svůj objem (až dvacetinásobně). [9]

Výpal perlitu probíhá dvoustupňově ve fontánové nebo (moderněji) kuželové peci:

- 350 – 500 °C (10 – 20 min.). Předehřívání, únik nejsnadněji vázané vody, přetlak vodní páry.
- 1100 – 1200 °C (5 – 6 sec.). Vlastní expanze → roztrhání perlitu.

Expandovaný perlit je sklovitý, bílé barvy, opálově zakalený a velmi jemně pórovitý. Jedná se o drobné kuličky polyedrické pěny. Označení perlitu EP 100 (číslo značí maximální objemovou hmotnost v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Prodává se v pytlích ne kilogramy ale na litry. [7]

Tabulka 8 - Požadavky na Perlit [7, 9]

Požadavek	Hodnota		Jednotka
	minimum	maximum	
Pórovitost (zavřené póry)	13	25	%
Celková pórovitost (včetně mezer mezi zrný)	-	95	%
Objemová hmotnost (volně sypaný)	70	350	kg·m ⁻³
Objemová hmotnost (EP 100)	75	85	kg·m ⁻³
Objemová hmotnost (EP 150)	120	150	kg·m ⁻³
Nasákavost *	i přes 300		% hmotnostních
Součinitel tepelné vodivosti (volně sypaný)	-	0,06	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Odolnost drcení (podle druhu)	0,14	0,4	MPa

* Pouze hrubší méně expandovaná zrna perlitu mají nasákavost menší než 100 % hmotnostně. Protože je pevnost zrn expandovaného perlitu velmi malá, zjišťuje se někdy také tzv. vydatnost nebo křehkost perlitu, která udává jeho odolnost proti rozrušení v míchačce na beton nebo maltu. Je vyjádřena poměrem objemu vyrobeného betonu k objemu použitého perlitu. Jakostní perlit má mít vydatnost větší než 1,00. [7]

5.1.4 Cihelná drť a cihloporit

Používání cihelné drti jako lehčeného kameniva do betonu se rozšířilo především po 2. světové válce, kdy jiná pórovitá kameniva nebyla prakticky vyráběna a kdy se tímto způsobem zužitkovávali zbytky domů (především v Německu). K drcení trosek a sutě se používalo pneumatických kladiv a čelistových drtičů. Jemného drcení se docílovalo na drtičích kuželových a válcových. Pozor se musel dávat na roztrhávání nevhodných cizorodých součástí. U nás se využívalo spíše průmyslového dopadu z výroby cihel.

Cihloporit se vyrábí z na písek chudých mastných jílu, přičemž čím je jíl plastičtější tím je jakost cihloporitu lepší. Maximální obsah jíloviny je asi 60 %. To proto, aby se mohla surovina silně vylehčit vyhořívajícím lehčivem, které má zároveň charakter ostřiva. Použitý jíl může mít maximálně 10 % uhličitanu vápenatého. Velikost cicvárů by neměla překročit 1 mm. [7]

Na samotnou výrobu cihloporitu se využívá kompletní cihlářská lina. Cihlářským lisem s ústím vytvářejícím větší kusy – balíky nebo podle způsobu pálení též malé válečky. Výrobky se potom suší. Následný výpal probíhá v běžných cihlářských pecích. Vyšší obsah spalitelných látek poté přispívá k značné úspoře paliva. Výroba cihloporitu se však nijak průmyslově nebo šířeji nepoužívá. [7, 10]



Obrázek 9 - Cihlový recyklát [24]



Obrázek 10 - Cihelná drť frakce 2-11 mm [25]

Tabulka 9 - Požadavky na cihelnou drť a cihloporit [7]

Požadavek	Hodnota		Jednotka
	minimum	maximum	
Pórovitost	25	45	%
Objemová hmotnost střepu	1400	2000	kg·m ⁻³
Objemová hmotnost (volně sypaná) frakce 7-15 mm	700	1200	kg·m ⁻³
Objemová hmotnost (setřesená) netříděno	1400	1700	kg·m ⁻³
Nasákavost	14	35	% hmotnostních
Hustota	2560	2750	kg·m ⁻³

* Vlastnosti cihelné drti a cihloporitu jsou si podobné. Hlavní rozdíl je větší pórovitost u cihloporitu a vlastnosti s pórovitostí související.

Cihelnou drť je nutné před zpracováním vlhčit. Kolísání vlastností cihelné drti bývá většinou v přijatelných mezích. [7]

5.1.5 Pórobetonová drť

Pórobetonová drť vzniká jako odpad při výrobě pórobetonu, po procesu autiklávování, nebo na stavbách (při demoličních, či výstavbových pracích).

5.2 Další možnosti využití odpadního pórobetonu

V dnešní době se používá pórobeton hlavně jako tepelně izolační materiál. Z pórobetonových tvárnic se staví stále častěji, což má za následek zvýšení výroby. S rostoucím využíváním pórobetonu se zvětšuje i množství odpadního pórobetonu. Z ekologického i ekonomického důvodu je snaha najít pro tento materiál další možnosti využití.

5.2.1 Čištění odpadních vod

Teng Bao et al. testovali pórobetonové kousky jako biofiltrové nosiče v biologických provzdušňovacích filtrech. Pórobetonové kousky byly charakterizovány pomocí rentgenové difrakce, rentgenové fluorescence, rastrovací elektronovou mikroskopií (SEM) a analýzou porozimetrie. Výsledky ukázali, že hlavní krystalické fáze SiO_2 , $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{H}_2$, CaO a Al_2O_3 jsou hlavní oxidy a hydrosilikáty v pórobetonových kouscích. Kromě toho měli pórobetonové kousky vysokou celkovou pórovitost (89,21 %) a vysoký měrný povrch ($81 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$). Rozdíl od komerčně užívaného keramzitu je ten, že pórobetonové kousky mají otevřenou makroporézní strukturu, která je vhodná pro zadržení mikroorganismů. [11]

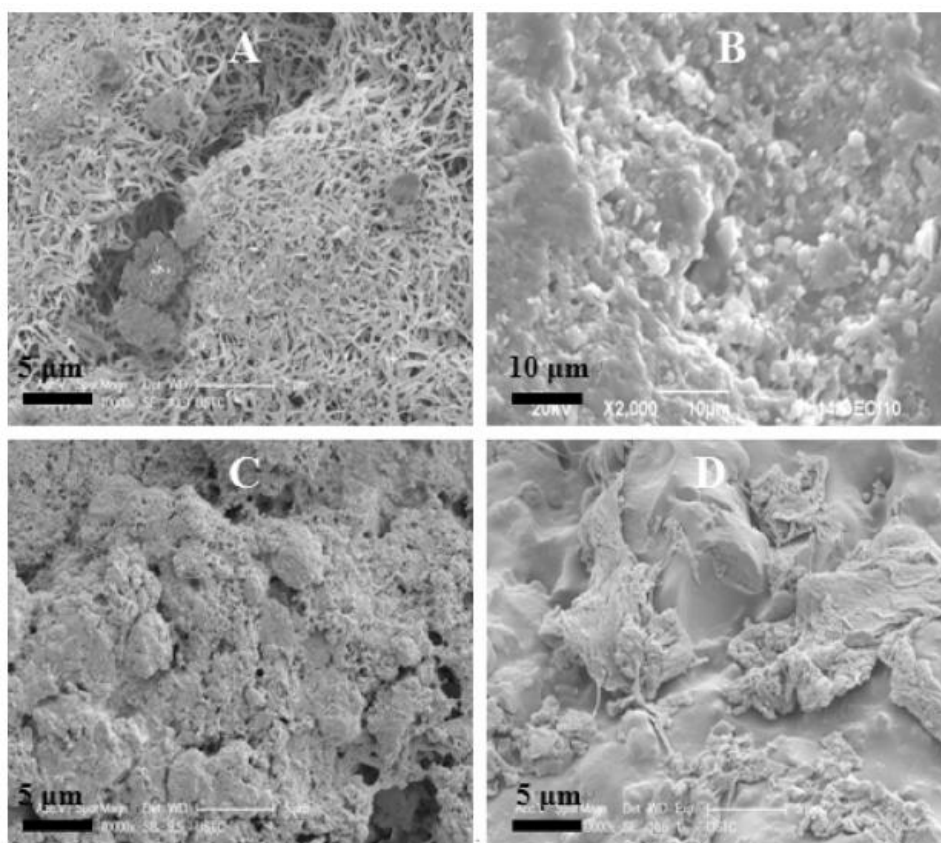
Tabulka 10 - Vlastnosti použitých materiálů [11]

Vlastnosti	Keramzit	Pórobeton	Jednotka
Průměr zrna	4 - 6	5 - 9	$\text{d} \cdot \text{mm}^{-1}$
Množství nečistot	≤ 1	3,34	%
Velikost pórů	≥ 42	69,10	%
Specifická plocha povrchu	$\geq 2 \cdot 10^3$	$8,1 \cdot 10^4$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$
Celková hustota	≤ 1000	530	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Zdánlivá hustota	1400 - 1800	1710	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Pevnost v tlaku	≥ 42	35 - 43	N
Pórovitost	-	89,21	%

Studie spočívala v naložení pórobetonových kousků a komerčně užívaného keramzitu do dvou identických biologicky provzdušňovacích filtrů, přičemž se porovnávala efektivitu mikrobiálního čištění odpadních vod. Provozní podmínky byly následující: teplota odpadní vody 20 - 26 °C, poměr A/W (vzduch/voda) 3:1, koncentrace rozpuštěného kyslíku > 4,00 mg·L a HRT (hydraulický retenční čas) v rozmezí od 0,5 – 7 h. [11]

Tabulka 11 - Průměrné hodnoty biologického provzdušňovacího filtru po odstranění pórobetonu a keramzitu v rozdílných HRTs [11]

	Ø TOC (%)				Ø NH ₃ -N (%)			
HRT (h)	0,5	1,75	3,5	7	0,5	1,75	3,5	7
materiál								
Pórobeton	28,82	59,51	66,79	79,70	67,11	92,55	95,55	70,50
Keramzit	27,20	50,10	68,00	63,90	50,50	53,90	49,40	91,20
	Ø TN (%)				Ø PO ₄ ³⁻ (%)			
HRT (h)	0,5	1,75	3,5	7	0,5	1,75	3,5	7
materiál								
Pórobeton	28,44	39,80	41,56	49,51	17,73	52,88	57,55	75,74
Keramzit	24,40	23,50	25,60	39,30	13,10	33,00	42,80	44,30



Obrázek 11 – SEM obrázek vnějších povrchů pórobetonu a keramzitu před a po mikrobiálním zatížení. A – Vnější povrch pórobetonu. B – Vnější povrch keramzitu. C – Vnější povrch pórobetonu po mikrobiálním zatížení. D – Vnější povrch keramzitu po mikrobiálním zatížení [11]

Výsledek ukázal, že biologický provzdušňovací filtr s pórobetonovými kousky byl účinnější v odstraňování TOC (celkový organický uhlík), $\text{NH}_3\text{-N}$ (amoniak), TN (celkový dusík) a PO_4^{3-} (fosfor) než filtr s keramzitem. [11]

5.2.2 Podlahové potěry

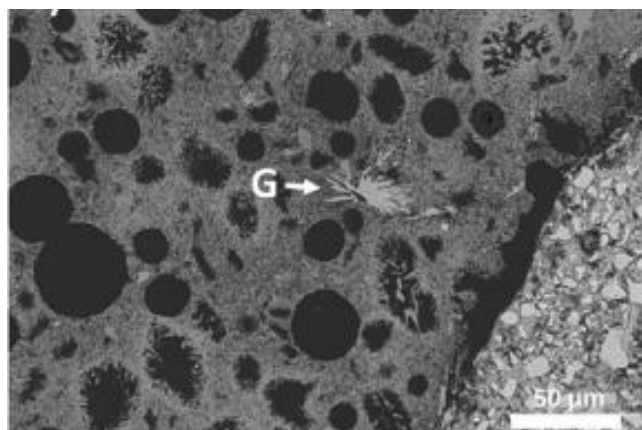
V této studii Jef Bergmans et al. zkoušeli možnost využití odpadního pórobetonu z demolic, jako náhradu písku do podlahového potěru. Studie prokázala, že pórobetonový demoliční odpad je možné využít jako kamenivo (frakce 0-8 mm) do receptury podlahového potěru. Vytvořila se tím nová cesta, jak využít pórobetonový odpad, který se v dnešní době často ukládá na skládky.

Reakce cementového tmele s uvolněným síranem z pórobetonového odpadu způsobuje tvorbu nerozpustného ettringitu, což výrazně snižuje vyluhování síranu. Limity louhování síranu jsou dány nizozemskými právními předpisy v oblasti životního prostředí.

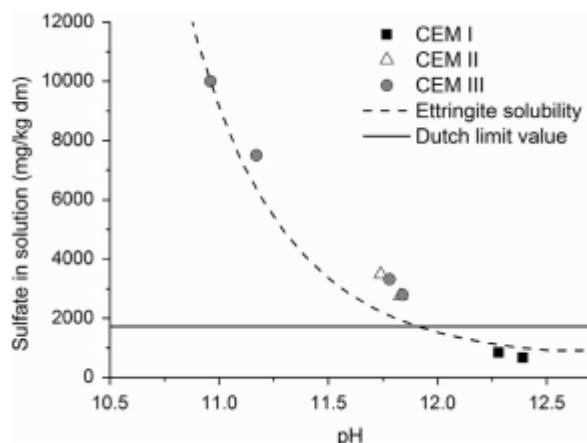
Dvě hlavní podmínky pro zastavení síranu jsou:

1. Vysoké pH, > 12 .
2. Velmi nízké znečištění pórobetonového odpadu sádrou.

Závislost pH na louhování síranu je v souladu s modelovou rozpustností ettringitu. Dostatečně vysoké pH získáme použitím cementu CEM I. Ve směsích cementů vykazujících nižší pH se v důsledku vyrovnání kapacity vyskytují pucolánové reakce. [12]

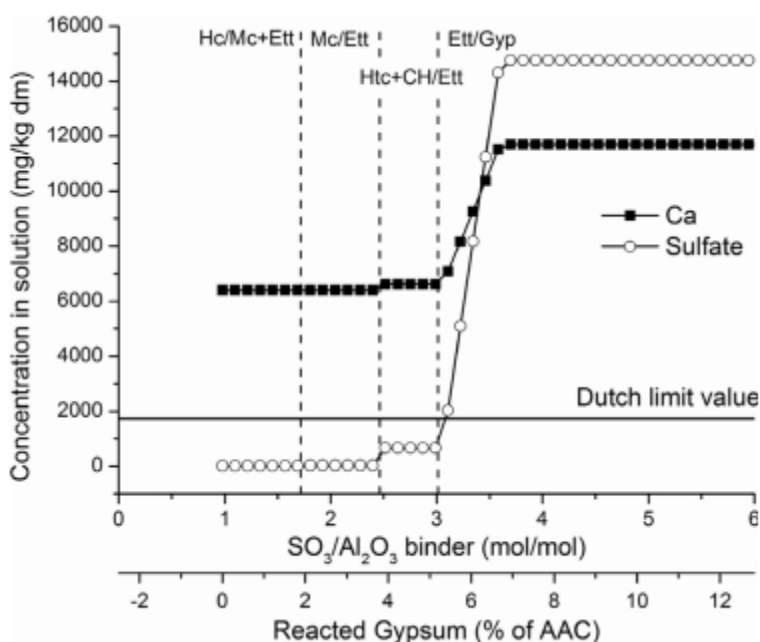


Obrázek 12 - Matrice podlahového potěru se zrny pórobetonového kameniva a uzavřenými krystaly sádrovce. (G) - Nezreagované sádrové zrno v matrici podlahového potěru. [12]



Obrázek 13 - Vylouhování síry z podlahové mazaniny (po 7 dnech) s čistým pórobetonovým kamenivem jako funkce pH k výluhu (poměr voda/pevná fáze, $L/S = 10$). Osa y – množství síranu v roztoku, osa x – pH. “CEM II”: CEM II/B-M (S–V) (21–35% vysokopecní struska a popílek ze spalování uhlí). “CEM III”: CEM III/A (36–65% vysokopecní struska). - - - - rozpustnost ettringitu. — Nizozemská limitní hodnota. [12]

Je-li pórobetonový odpad znečištěný sádrou (např. ze sádrokartonu) je schopnost snižování louhovaného síranu oslabena. Ettringit totiž vzniká reakcí cementového tmele a sádry, nikoli reakcí cementového tmele se síranem. [12]



Obrázek 14 – Modelová reakce sádry a síranu s Ca a koncentrace síranu ve výluhu z podlahového potěru s CEM I ($L/S = 10$). Nerozlišuje se mezi sádrou ze samotného pórobetonu, nebo znečišťující sádrou z průběhu recyklace. Předpokládá se termodynamická rovnováha a koncentrace síranu je řízena (zpomalována) chemickou vazbou s příslušným hydrátovým párem: hemihydrát/monohydrát + ettringit (Hc/Mc + Ett), monohydrát/ettringit (Mc/Ett), hydrotalcit + portlandit/ettringit (Htc + CH/Ett), ettringit/sádra (Ett/Gyp). Pokud jsou holandské limity po výluh jednou překročeny, sádro již nelze použít k vytvoření ettringitu. [12]

S použitím cementu CEM I a kvalitním pórobetonovým odpadem je možné úspěšně recyklovat pórobetonový odpad z demolic a vyrábět přitom velmi kvalitní stavební výrobek. [12]

5.2.3 Alternativní výplňový materiál v gumárenském průmyslu

Wanvimon Arayapranee et al. provedli studii možnosti využití odpadního pórobetonu jako levnějšího plniva v gumárenském průmyslu. K přírodnímu kaučuku bylo přidáno různé množství odpadního pórobetonu (0 – 60 prh, dílů na sto dílů gumy), jako nového ekologického materiálu upraveného s použitím dvou válcových mlýnů. [13]

Tabulka 12 - Složky použité ve studii [13]

Složky	Možství	Jednotka
Přírodní kaučuk	100	phr*
Oxid zinečnatý	5,0	phr
Kyselina stearová	2,0	phr
CBS**	1,5	phr
TMTD***	0,5	phr
Síra	2,4	phr
PEG (3350)****	2,0	phr
Plniva	-	-
Pórobetonový odpad	0 - 60	phr
Komerční CaCO ₃	0 - 60	phr
Oxid křemičitý	0 - 60	phr

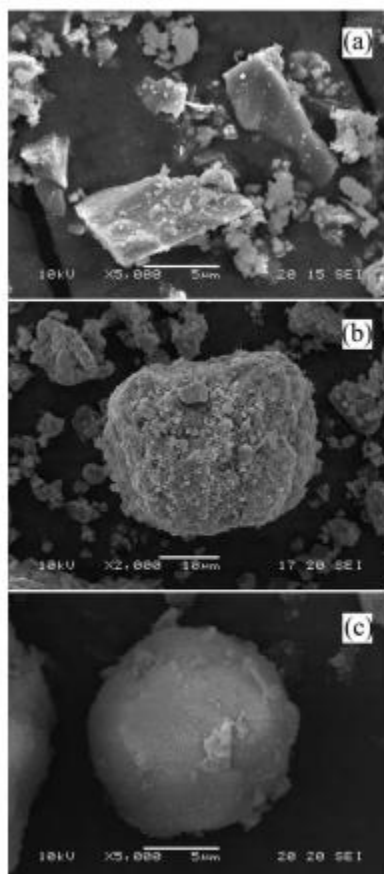
* prh, dílů na sto dílů gumy

** N-cyclohexyl-2-benzothiazole-2-sulphenamide

*** Tetramethylthiuram disulfide

****pouze tam kde je jako plnivo SiO₂

Následně byly zkoumány jejich vytvrzovací vlastnosti, mechanické vlastnosti, stárnutí, morfologie a nakonec srovnání s komerčně používanými plnivými (CaCO₃ a SiO₂). Ve většině případů při použití SiO₂ jako plniva byly vytvrzovací vlastnosti, mechanické vlastnosti a stárnutí výrazně lepší než při použití pórobetonového odpadu nebo CaCO₃. Nicméně vlastnosti vzorků s pórobetonovým plnivem byly lepší než s plnivem CaCO₃. [13]



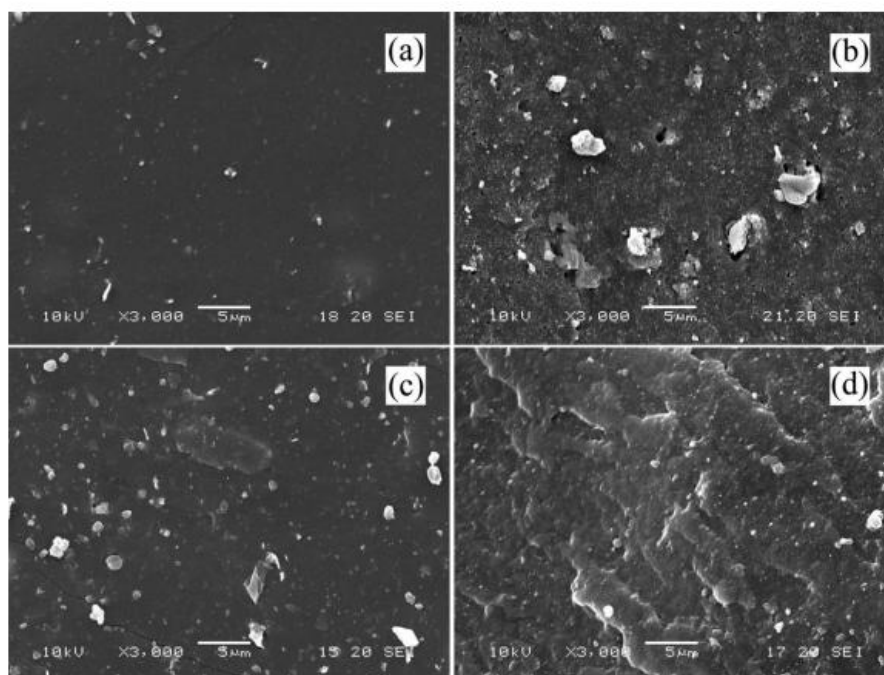
Obrázek 15 - SEM analýza různých plniv. (a) CaCO_3 při zvětšení 5000 x, (b) pórobeton při zvětšení 2000 x, (c) SiO_2 při zvětšení 5000 x. [13]

Důvodem může být větší měrný povrch pórobetonového odpadu. Ozónová a tepelná odolnost se u kompozitů s SiO_2 nebo pórobetonem výrazněji zlepšila, zatímco při použití CaCO_3 bylo zlepšení minimální. [13]

Tabulka 13 - Fyzikální vlastnosti plniv [13]

Plniva	Velikost částic (μm)	Měrný povrch ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
Pórobetonový odpad	45	34,8
CaCO_3	5,3	2,8
SiO_2	18	165

Rastrovací elektronový mikroskop (SEM) ukázal, že morfologie gumy naplněné SiO_2 je oproti výplni z pórobetonu nebo CaCO_3 jemnější a více homogenní. Pokud ovšem srovnáme pouze pórobetonovou a CaCO_3 výplň, ukázala SEM analýza lomové plochy u pórobetonového plniva lepší plnicí disperzi a silnější vzájemné působení plniva s matricí. [13]



Obrázek 16 - SEM analýza povrchu zlomeného tahem, před tepelným stárnutím. (a) přírodní kaučuk, (b) CaCO_3 (30 phr), (c) pórobetonová drť (30 phr), (d) SiO_2 (30 phr). Zvětšeno 3000 x. [13]

Celkové výsledky ukázaly, že celkové vlastnosti přírodního kaučuku s pórobetonovou výplní jsou podstatně lepší než kaučuky s CaCO_3 výplní. Proto může být pórobetonový odpad efektivně využitý jako levnější plnivo v gumárenském průmyslu. [13]

5.2.4 Zelené střechy

Zelené střechy jsou obvykle vyrobeny z přírodních materiálů, jako jsou lapili nebo pemza. Tyto materiály mají stejné porézní charakteristiky jako pórobeton. Franco Bisceglie et al. provedli studii možnosti využití odpadního pórobetonu jako lehkého materiálu pro zelené střechy. Byl použit pórobetonový odpad frakce 0,5 – 1 mm a 3 – 10 mm. [14]



Obrázek 21 – Pórobetonový odpad frakce 0,5 – 1 mm. [14]



Obrázek 22 – Pórobetonový odpad frakce 3 – 10 mm. [14]

Pro potvrzení své hypotézy použili směs 70 % půdy a přírodní rašeliny s 30 % granulovaného pórobetonu, a provedli chemickou a fyzikální analýzu. Všechny analyzované fyzikální a chemické vlastnosti byly provedeny podle normy UNI 11235, která uvádí vlastnosti podkladu pro zelené střechy. Po srovnání výsledků s hodnotami přírodních zelených střech našli dobrou spojitost mezi těmito dvěma skupinami hodnot. [14]

Nejdůležitější údaje jsou následující:

- Hodnota pH byla neutrální (7,23). Tím je zajištěno přizpůsobení tlusticovitých rostlin, vybraných pro jejich silnou odolnost v extrémních podmínkách (silné sluneční záření, nedostatek vody)
- Zdánlivá hustota je $459,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.
Což spadá do intervalu $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2} < D < 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, který udává platná právní úprava o pomocných půdních látkách a pěstebních substrátech.
- Požadavek pro vysokou schopnost zadržovat vodu byl splněn také. Poměr nasáklého a suchého vzorku byl 222,62 %.

Dvě hodnoty však požadavky neslnily:

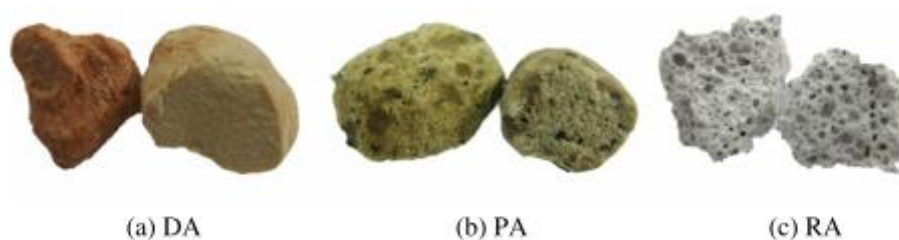
- Hodnota propustnosti $0,048 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ byla nižší, než požadovaných $> 0,3 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.
- Hodnoty porozity 62 % byla nižší, než požadovaných 75 % a více.

Tyto rozdíly nejsou připisovány skutečným odchylkám od požadavků, ale limitům spojeným s Proctorovým testem.

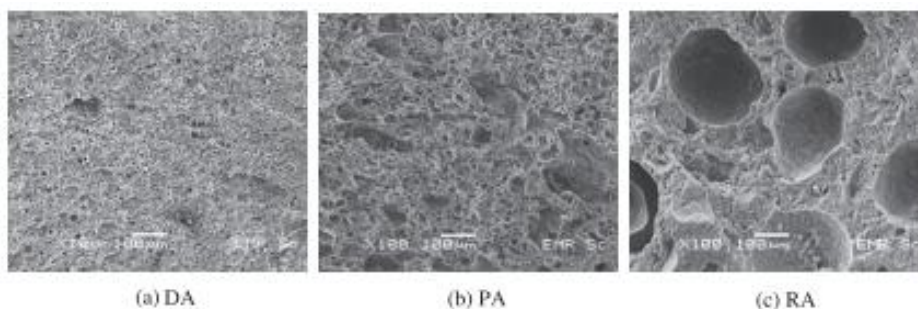
Podle zjištěných výsledků je tedy granulovaný pórobetonový odpad možné použít i jako lehčený materiál pro vnitřní strukturu zelených střech. [14]

5.2.5 Lehčené plnivo do propustného betonu

Yuwadee Zaetang et al. provedli studii využití lehkého kameniva pro výrobu lehkého propustného betonu. Jako zástupce přírodních pórovitých kameniv použili diatomit a pemzu, pórobetonová drť byla použita jako průmyslově vyráběné pórovité kamenivo. Všechny tři druhy kameniv byly použity jako hrubá frakce kameniva. Diatomit (DA) pocházel z provincie Lampang ze severu Thajska, byl žíhán 4 h při 800 °C pro snížení jílových minerálů. Komerčně vyráběná kyselá pemza (PA). Pórobetonová drť (RA) byla z rozbitých pórobetonových bloků. Všechna tři kameniva byla rozdrcena a roseta, pro získání stejné frakce kameniva 4,8 – 9,5 mm. Všechna kameniva byla před použitím nasáklá vodou. Měnil se také obsah cementové pasty (15 %, 20 %, 25 %). [15]



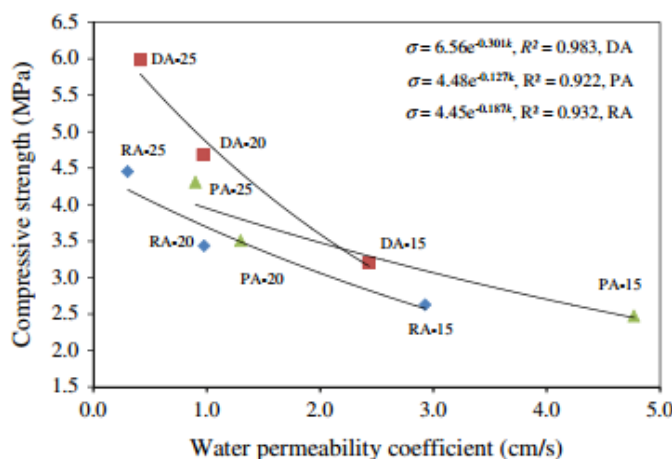
Obrázek 17 – Druhy použitého lehkého kameniva [15]



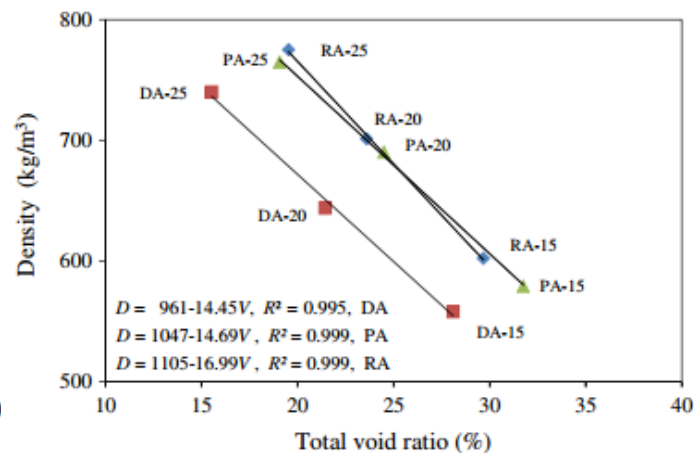
Obrázek 18 - SEM snímek povrchů použitých lehkých kameniv (zvětšení 100 x) [15]

Výsledky ukázali, že všechna tři hrubá pórovitá kameniva snižují hustotu. Hustota byla v rozmezí 558 – 775 kg·m⁻³. (vzorky s pórobetonovým kamenivem měly hustotu v rozmezí 600 – 700 kg·m⁻³) Všechna tři kameniva také snižují hodnotu

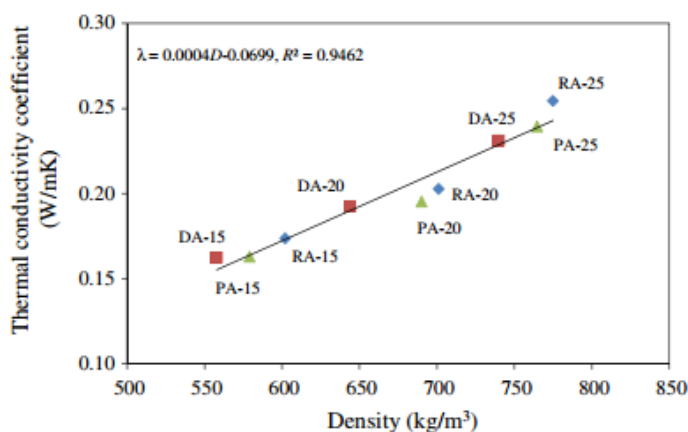
tepelné vodivosti ($0,16 - 0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), která byla oproti normálně používanému přírodnímu kamenivu nižší přibližně 3 - 4 krát. (vzorky s pórobetonovým kamenivem měli hodnotu tepelné vodivosti $0,17 - 0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Pevnosti v tlaku po 28 dnech se pohybovali v rozmezí 2,47 - 5,99 MPa a mohou být teda použity i jako izolační materiály. (pevnost v tlaku vzorků s pórobetonem byla v rozmezí 2,8 – 8,5 MPa.) [15]



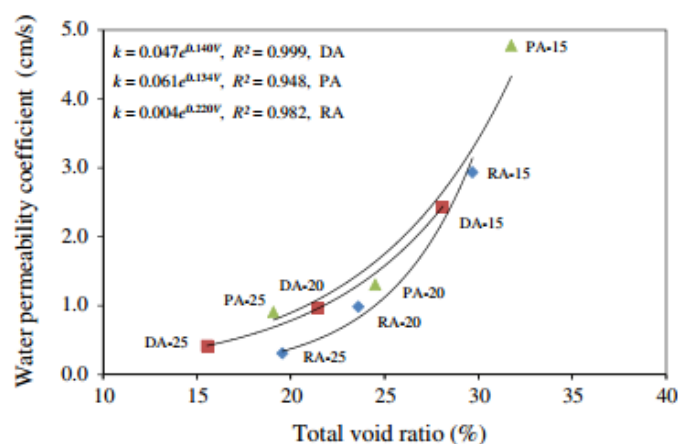
Obrázek 19 - Pevnost v tlaku a koeficient vodní propustnosti pro propustný beton s lehkým kamenivem. [15]



Obrázek 26 – Hustota a celkový poměr dutin v propustném betonu s lehkým kamenivem. [15]



Obrázek 27 - Součinitel tepelné vodivosti a hustota propustného betonu s lehkým kamenivem [15]



Obrázek 28 – Koeficient vodní propustnosti a celkový poměr dutin v propustném betonu s lehkým kamenivem. [15]

Zvyšováním obsahu cementové pasty se snižoval celkový poměr dutin a propustnost vody. Naopak se zvyšovali mechanické vlastnosti a hustota. Nejlepší propustnost vody měli vzorky, kde byla jako kamenivo použita pemza. Lehký

propustný beton obsahující diatomit vykazoval o trochu vyšší kvalitu mechanických vlastností. [15]

5.2.6 Kamenivo do lehkého geopolymerního betonu

V tomto výzkumu sledovali Patcharapol Posi et al. vlastnosti lehčeného geopolymerního betonu s kamenivem z recyklovaného drceného pórobetonu. Recyklovaný blok byl rozdrčen a rozřazen do jemné 0,001 – 1,18 mm (FA), střední 1,18 – 4,75 mm (MA) a hrubé 4,75 – 12,5 mm (CA) frakce. [16]



Obrázek 29 - Hrubé, střední a jemné recyklované kamenivo [16]

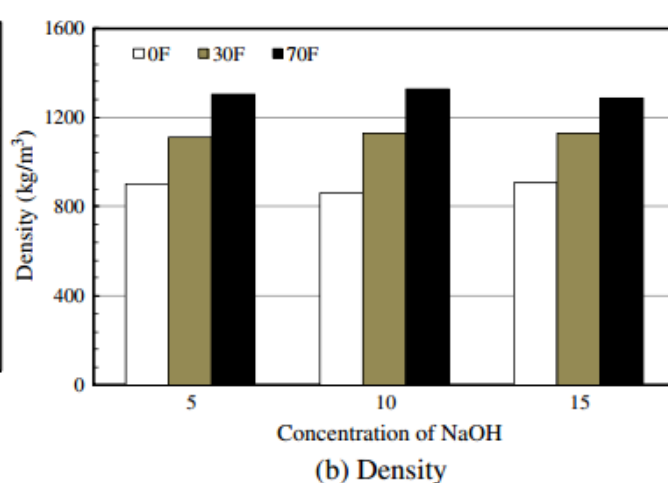
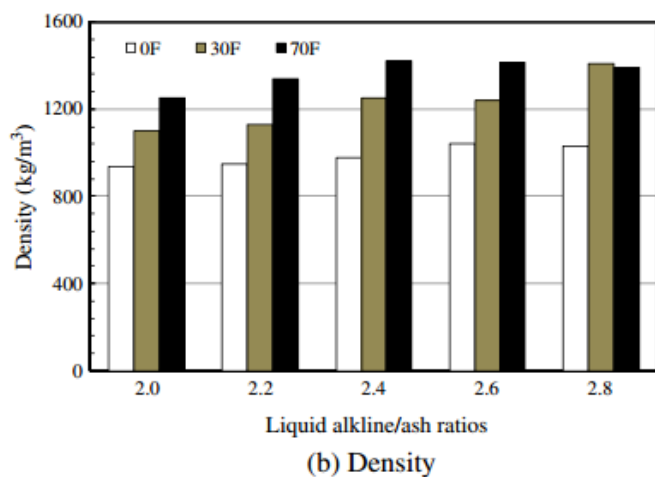
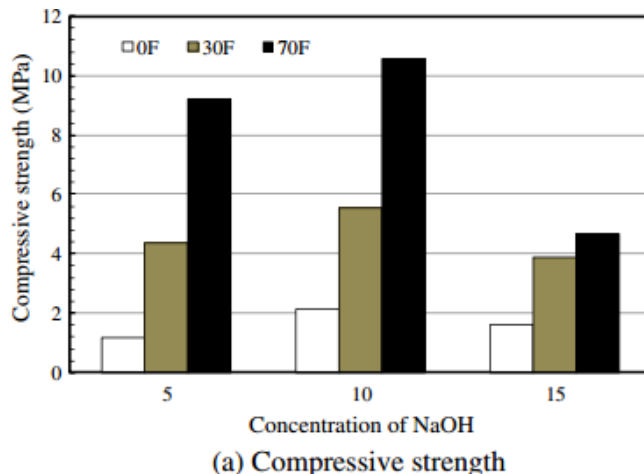
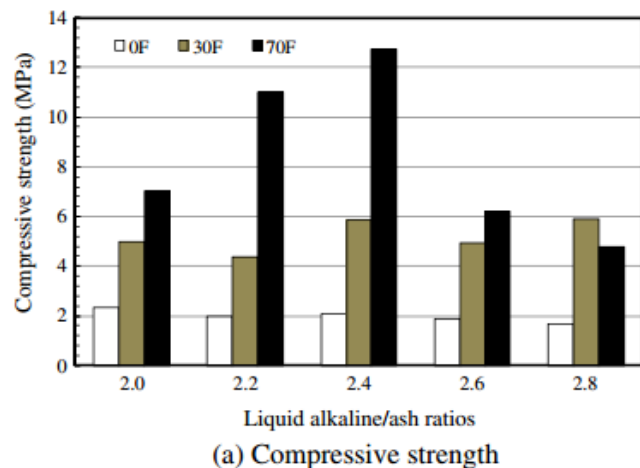
Materiály použité pro tento výzkum byly: popílek z hnědého uhlí (elektrárna Mae Moh, severní Thajsko), křemičitan sodný (15,32 % Na_2O , 32,87 % SiO_2 a 51,8 % vody), hydroxid sodný (ve třech koncentracích 5, 10, 15 M) a recyklovaného pórobetonového kameniva. [16]

Tabulka 14 - Fyzikální vlastnosti materiálů [16]

Vlastnosti	Popílek	FA	MA	CA	Jednotka
Specifická váha	2,52	2,61	1,96	1,42	-
Střední velikost částic	18,6	-	-	-	μm
Velikost částic	-	0,001-1,18	1,18-4,75	4,75-12,5	mm
Modul jemnosti	-	1,75	3,9	5,74	-
Hustota	-	720	390	360	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Nasákavost	-	56	68	76	%

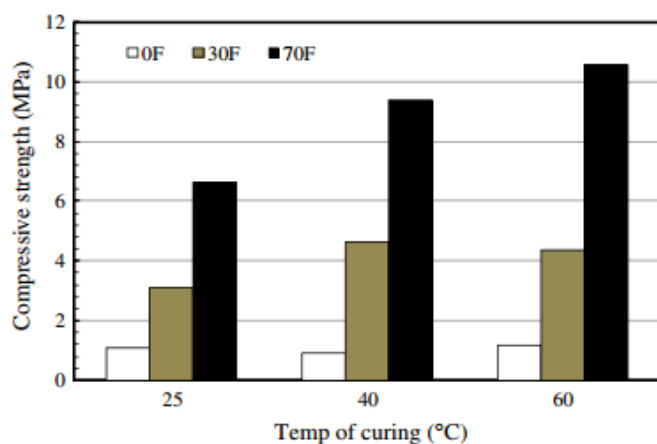
Pro studium účinků kameniva byla hrubá frakce kameniva konstantní (30 % hmotnostních) a jemná a střední frakce se měnily. Vytvořily se tři směsi kameniva (poměr FA:MA:CA): 0:70:30 (0F), 30:40:30 (30F), 70:0:30 (70F).

Sledovala se pevnost v tlaku a hustota s různými poměry kapalné zásady/popílku, poměr křemičitanu sodného/ NaOH, koncentrace NaOH, poměr kamenivo/popílek a teploty zrání. Kromě toho se stanovila pórovitost, nasákavost a modul pružnosti. [16]

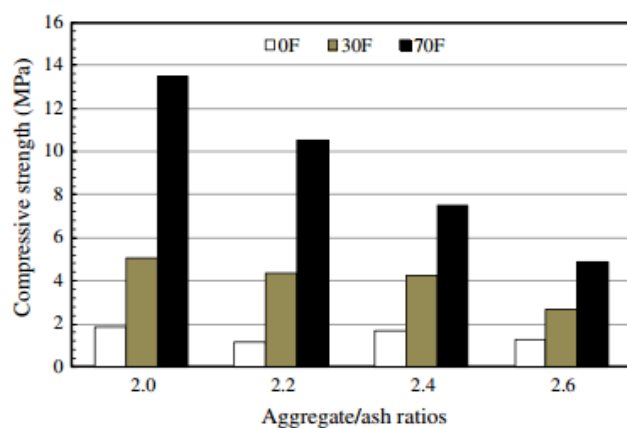


Obrázek 30 - Pevnost v tlaku a hustota lehkého geopolymerního betonu po 28 dnech v závislosti na poměru kapalné zásady/popílku. [16]

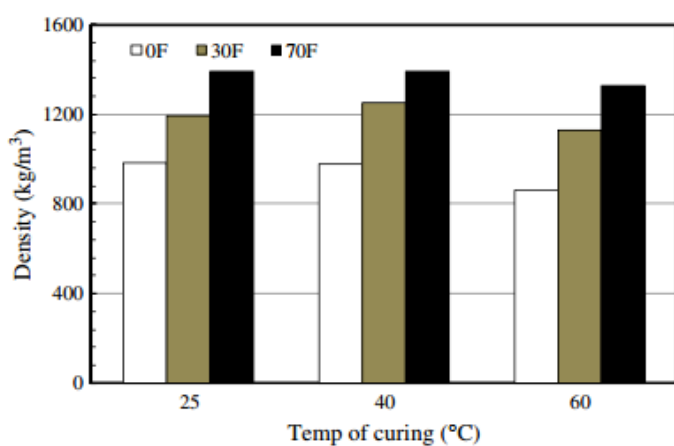
Obrázek 31 - Pevnost v tlaku a hustota lehkého geopolymerního betonu po 28 dnech v závislosti na koncentraci NaOH. [16]



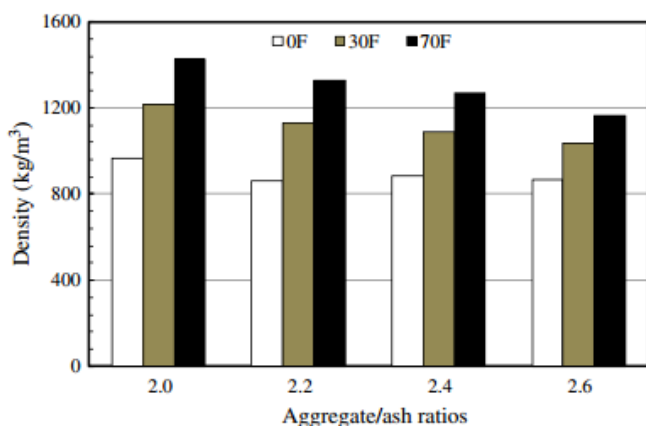
(a) Compressive strength



(a) Compressive strength



(b) Density



(b) Density

Obrázek 32 - Pevnost v tlaku a hustota lehkého geopolymerního betonu po 28 dnech v závislosti na teplotě zrání. [16]

Obrázek 33 - Pevnost v tlaku a hustota lehkého geopolymerního betonu po 28 dnech v závislosti na poměru kamenivo/popílek. [16]

Na základě získaných údajů může být pórobetonové kamenivo použito jako lehké kamenivo do lehkých geopolymerních betonů. Pevnost v tlaku se zvyšuje s rostoucím poměrem křemičitanu sodného/ NaOH a teplotou zrání, naopak klesá s větším poměrem kameniva/popílek. Pro maximální pevnost v tlaku byl optimální poměr L/A (kapalné zásady/popílek) 2,4 a koncentrace NaOH 10 M. Hustota lehkého geopolymerního betonu se zvýšila s rostoucím L/A, naopak klesala s rostoucím poměrem teploty zrání. Koncentrace NaOH a poměr křemičitanu sodného/ NaOH nemá na hustotu vliv.

Poměr kameniva/popílek měl významný vliv na vlastnosti lehkého geopolymerního betonu. Větší množství kameniva zlepšilo schopnost absorpce vody a zvýšilo pórovitost geopolymerních bloků. Větším poměrem kamenivo/popílek vzrostla také pevnost v tlaku, hustota a modul pružnosti. [16]

Výsledky ukázaly, že 28 denní pevnost v tlaku lehkého geopolymerního betonu je v rozmezí 1,0 – 16,0 MPa. Hustota se pohybuje v rozmezí 860 – 1400 kg·m⁻³. Díky tomu je možné využívat lehký geopolymerní beton pro zděné stěny a příčky. [16]

6 CÍL PRÁCE

Bakalářská práce si klade především dva základní cíle. Prvním cílem je zhodnocení vlastností pórobetonové drti s komerčně vyráběnými lehkými kamenivy. Druhým a stěžejním cílem práce je pak nalezení optimálního množství náhrady křemičitého písku pórobetonovou drtí v silikátovém kompozitu. Pozornost bude věnována prokázání vlivu příměsi pórobetonové drtě na fyzikálně-mechanické vlastnosti, kvalitu a množství tobermoritu ve vytvořeném kompozitu.

Pro dosažení prvního cíle bude nezbytné stanovení fyzikálně-mechanických vlastností, jako jsou nasákavost, sytná objemová hmotnost a odolnost proti drcení. Srovnáním parametrů s vlastnostmi komerčně produkováných kameniv, bude ověřena teoretická možnost použití pórobetonové drti jako kameniva.

Významným cílem práce pak bude ověření možnosti využití pórobetonové drtě jako náhrady písku v technologii výroby pórobetonu. Bude vytvořen soubor záměsů s rozdílným množstvím dvou typů drtě. Na kompozitech bude stanovena objemová hmotnost a pevnost v tlaku. Pomocí těchto fyzikálně-mechanických parametrů a následného rozboru mikrostruktury pak bude prokázán vliv množství drtě na vlastnosti kompozitu a doporučen další postup optimalizace příměsi pórobetonové drtě jako vstupní suroviny pro výrobu pórobetonu.

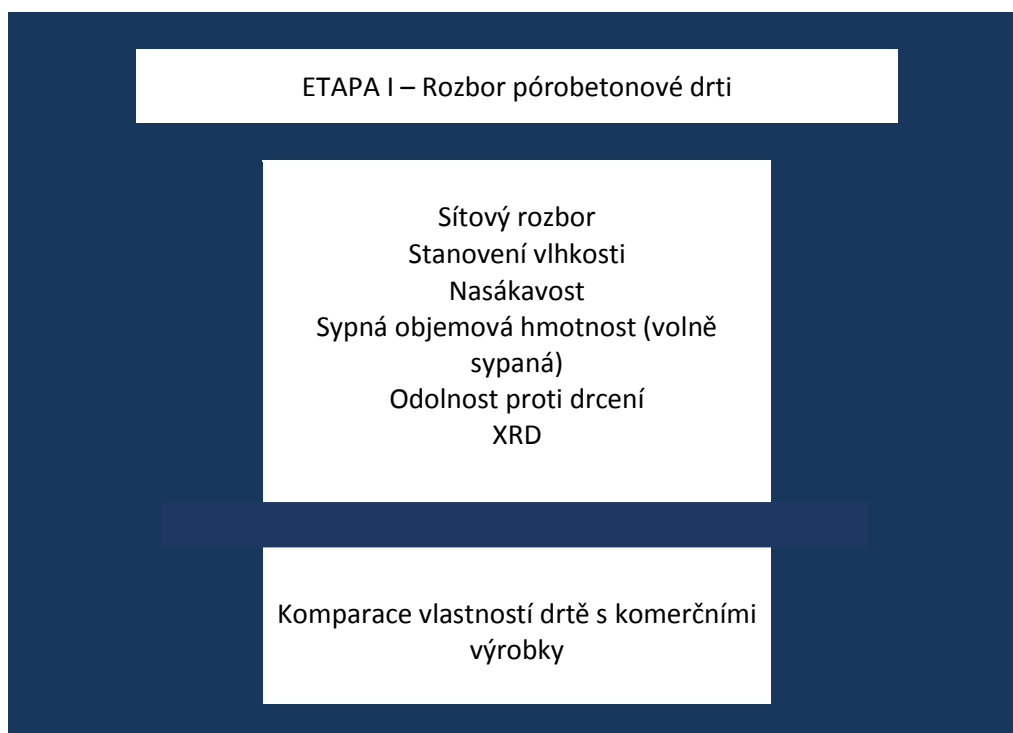
7 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část je rozdělena do tří etap. První etapa praktické části je věnována rozboru pórobetonové drti, provedení a vyhodnocení vybraných zkoušek.

Druhá etapa praktické části se zabývá složením vstupních surovin, přípravou vzorků s různým množstvím pórobetonové drti a vytvořením autoklávovaných kompozitů.

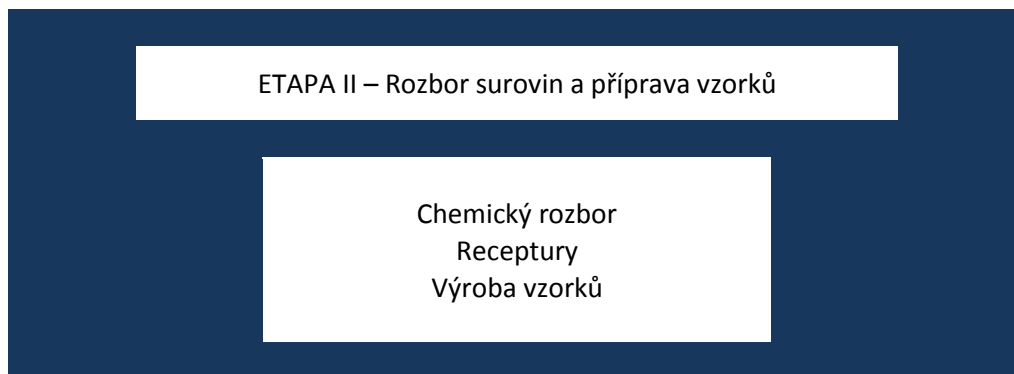
Třetí etapa navazuje na etapu druhou. Vyhodnocuje fyzikálně-mechanické vlastnosti autoklávovaných kompozitů a jejich mikrostrukturu. Cílem bude stanovit optimální náhradu pórobetonové drtě v autoklávovaném kompozitu.

8 METODIKA PRÁCE

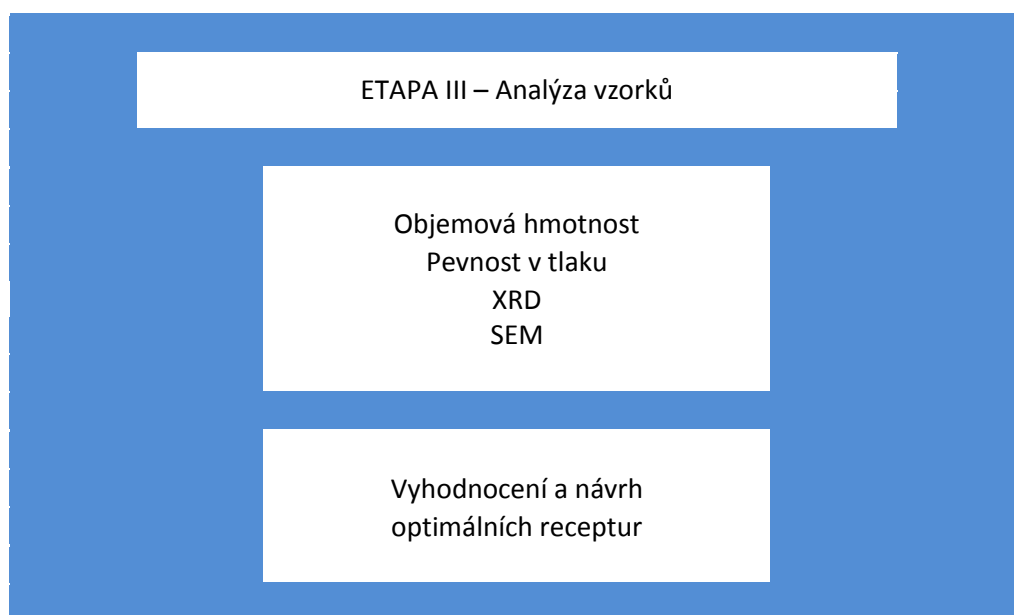


První etapa praktické části se věnuje charakterizaci pórobetonové drti. Bude hodnocena jak z fyzikálně-mechanické, tak mineralogické stránky. Pórobetonová drť bude vysušena v sušárně do ustálení hmotnosti. Následně bude na drti proveden sítový rozbor, pro zjištění granulometrie. Ta má vliv na další vlastnosti: nasákavost, sypanou objemovou hmotnost a odolnost proti drcení.

Provedením těchto zkoušek a jejich srovnáním s popílkovým agloporitem, keramzitem, expandovaným perlitem a cihelnou drtí, bude ověřena možnost použití pórobetonové drti jako kameniva.



Druhá etapa praktické části se věnuje chemickému rozboru vstupních surovin. Následně je z nich vytvořen soubor záměsí lišících se procentuálním obsahem pórobetonové drti dvou jemností (která nahrazuje křemičitý písek). Na vzorcích jsou provedeny zkoušky, které se následně vyhodnocují.



Vyhodnocením zkoušek se zabývá třetí etapa. Zde jsou graficky znázorněny výsledky objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku jednotlivých vzorků. Mineralogické složení bude sledováno pomocí XRD – difraktometru, díky kterému bude možné porovnat množství vzniklého tobermolitu. Nakonec bude na vybraných vzorcích díky

SEM možné porovnat vzhled krystalů tobermolitu. Nakonec je zhodnoceno optimální množství náhrady křemičitého písku pórobetonovou drtí.

8.1 Použité metody a postupy

- **Stanovení vlhkosti**

Pro stanovení vlhkosti byla použita metoda sušení v sušárně. Metoda se provádí podle normy ČSN EN 1097-5. Zjišťuje se celková volná voda přítomná ve zkušební navážce kameniva. Zkušební navážka se zváží a vysuší v sušárně s nuceným oběhem vzduchu o teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Obsah vlhkosti se stanoví jako rozdíl hmotností mezi vlhkým a suchým vzorkem. Vyjadřuje se v % hmotnostních.

- **Sítový rozbor**

Pro stanovení zrnitosti sítovým rozbohem byla použita normová sada drátěných sít podle ČSN ISO 2395. Při stanovení zrnitosti vysušeného kameniva se postupuje podle normy ČSN EN 933-1.

Do normové sady sít se vsypala určená navážka vysušené pórobetonové drti. Síta i s navážkou se usadily do střešacího stojanu. Následovala 5 minutová vibrace. Po skončení vibrace se postupně zvážil zůstatek na jednotlivých sítích.

- **Nasákavost**

Pro stanovení nasákavosti byla použita norma ČSN EN 1097-6. Vysušená navážka pórobetonové drti se zalila destilovanou vodou a nechala 24 hodin odležet. Vodou nasycená pórobetonová drť byla vzhledem k vyššímu podílu jemné frakce přefiltrována. Následným dosečením do vzorce se zjistila nasákavost pórobetonové drti.

- **Sypná objemová hmotnost**

Pro stanovení sypné objemové hmotnosti byla použita norma ČSN EN 1097-3. Podle tabulky 1 byl zvolen objem nádoby 1 l, pro kamenivo do 4mm. Byla stanovena jak sypná objemová hmotnost volně sypaného, tak setřeseného kameniva. Sypná objemová hmotnost volně sypaného kameniva se vypočítá jako poměr hmotnosti nasypného vzorku k objemu nádoby.

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

ρ_b – sypná hmotnost volně sypaného kameniva [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

m_2 – hmotnost nádoby se zkušební navázkou [g]

m_1 – hmotnost prázdné nádoby [g]

V – objem nádoby [l]

- **Odolnost proti drcení**

Odolnost proti drcení byla stanovena podle normy ČSN EN 13055-1 příloha A. Při zkoušce odolnosti proti drcení se připravený vzorek pórovitého kameniva vloží do speciálního válce a zhutní se vibrací. Kamenivo je pak pístem stlačováno ve válci na stanovenou vzdálenost, přičemž se měří síla, která vyjadřuje odolnost proti drcení. Odolnost proti drcení se vyjadřuje v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$.

$$C_a = \frac{L + F}{A}$$

C_a – odolnost proti drcení [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$]

L – síla vyvozovaná pístem [N]

F – tlak při stlačení [N]

A – plocha pístu [mm^2]

- **Autoklávovací zařízení**

Pro výrobu zkušebních vzorků bylo potřeba zajistit hydrotermální podmínky. Pro tento účel byly použity autoklávovací kaple. Do vnitřní nádoby byla nalita destilovaná voda (10-15 % objemu nádoby). Autoklávování probíhalo 12 hodin při teplotě 190 °C. Vzorky do těchto kapslí byly zhotoveny podle zvolených receptur v ocelových trojformách. Vzorky měly rozměry 20x20x100 mm.



Obrázek 34 - Autoklávovací kapsle [9]

- **Lisy – stanovení pevností**

Pro stanovení pevností na vytvořených vzorcích byl použit školní laboratorní lis. Tělesa byla uložena do úložných destiček o délce a šířce 20 mm. Pevnost v tlaku se vypočte z maximálního zatížení při rozdrčení tělesa. Jedná se o sílu působící na plochu. Vyjadřuje se v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ (MPa). Podle normy ČSN EN 1015-11.

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

R_c – pevnost v tlaku [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$] (MPa)

F_c – maximální zatížení při porušení [N]

A – průřezová plocha tělesa, na kterou působí zatížení, vypočtená ze zvolených rozměrů nebo ze změřených rozměrů tělesa [mm^2]



Obrázek 35 - Laboratorní školní lis (v levé části obrázku), úložné destičky (v pravé části obrázku)

- **Objemová hmotnost**

Objemová hmotnost na vytvořených vzorcích se stanoví jako poměr jeho hmotnosti a objemu. Zkušební tělesa se zkoušejí ve vysušeném stavu. Vyjadřuje se v $\text{kg}\cdot\text{m}^3$. Podle normy ČSN EN 1015-10.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ρ – objemová hmotnost tělesa [$\text{kg}\cdot\text{m}^3$]

m – hmotnost vysušeného tělesa [kg]

V – objem zkušebního tělesa [m^3]

- **XRD – difrakční analýza**

Pomocí XRD – difraktometru můžeme stanovit mineralogické (fázové) složení všech látek, které mají krystalický charakter. Na vzorcích bylo zjišťováno kvalitativní složení, je ale možné zjistit i kvantitu mineralogických fází v jednotlivých zkoušených materiálech.

Analýza je založená na difrakci paprsků, která nastává při splnění:

1. Podmínky, že společný úhel rozptylu obou paprsků bude roven úhlu dopadu θ původního svazku.
2. Bude splněna podmínka Braggovy rovnice $2 \cdot d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda$.

Známe-li vlnovou délku λ a změříme úhel θ , můžeme určit mezimřížkovou vzdálenost d , díky které můžeme určit, jaké minerály jsou ve zkoumané látce obsaženy. [17]



Obrázek 36 - Zařízení XRD PANalytical Empyrean, Cu – katoda $\lambda = 1,540598$ pro záření $K\alpha_1$ [18]

- **Rastrovací elektronový mikroskop**

Na vytvořených trámečkách byly získány snímky rastrovacím elektronovým mikroskopem, který dokáže snímat až sedm vzorků během jednoho měření a to jak v nízkém, tak ve vysokém vakuu. Maximální možné zvětšení je při urychlovacím napětí 30 kV 1 000 000 \times .

Skenovací elektronová mikroskopie funguje na principu detekování signálů, které primární paprsek elektronů uvolnil nad povrchem preparátu. Detektory snímají sekundární a odražené elektrony, které následně elektronika zpracuje a vytvoří obraz. Ten je skládán zobrazováním jednotlivých bodů, a to řádek po řádku.

Primární paprsek vytváří na povrchu vzorku prostor, v němž dochází k interakci elektronů s hmotou. Vznikají různé signály, které jsou snímány a analyzovány jako např. charakteristické RTG záření. Jeho pomocí můžeme určit prvkové složení krystalu, na který je zaměřen paprsek elektronů. [17]



Obrázek 37 - SEM Tescan MIRA3 XMU od firmy TESCAN [18]

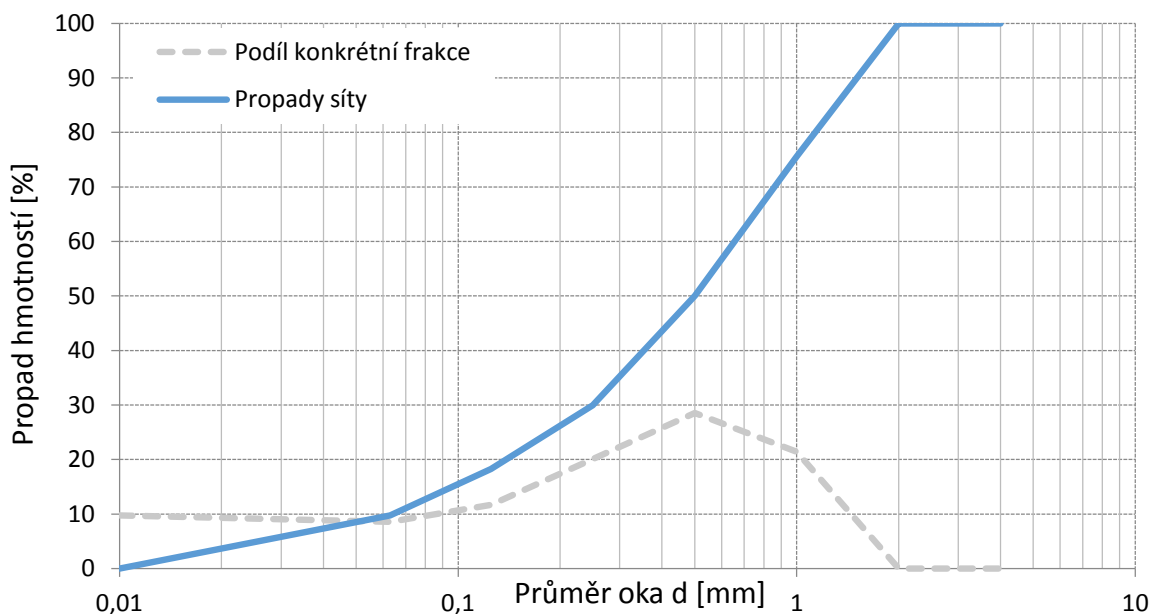
9 ETAPA I – ROZBOR PÓROBETONOVÉ DRTI

Etapa I se věnuje zkouškám pórobetonové drti. Pro výzkum byla použita pórobetonová drť přímo z drtiče výrobního závodu na pískový pórobeton. Drť vznikla přímo ve výrobě, ze zmetků. Kusy pórobetonu byly dvoufázově drceny. V první fázi pomocí dvouválcového ozubeného drtiče. Ve fázi druhé kladivovým drtičem na frakci 0-2 mm.

Pórobetonová drť byla vysušena v sušárně do konstantní hmotnosti. Na vysušené drti byl následně proveden síťový rozbor pro určení zrnitosti. Následně byly provedeny zkoušky nasákavosti, sypná objemová hmotnost (volně sypaná) a odolnost proti drcení. Pro zjištění mineralogického složení drti byla použita XRD - difrakční analýza.

Nakonec byla provedena komparace pórobetonové drti s komerčně vyráběnými kamenivý (popílkový agloporit, keramzit, expandovaný perlit a cihelná drť).

Zkouška stanovení vlhkosti ukázala, že pórobetonová drť obsahovala 27,35 % vody. To je zapříčiněno jemností drti. Její pórovitý povrch má za následek velký měrný povrch, který dobře váže vodu.



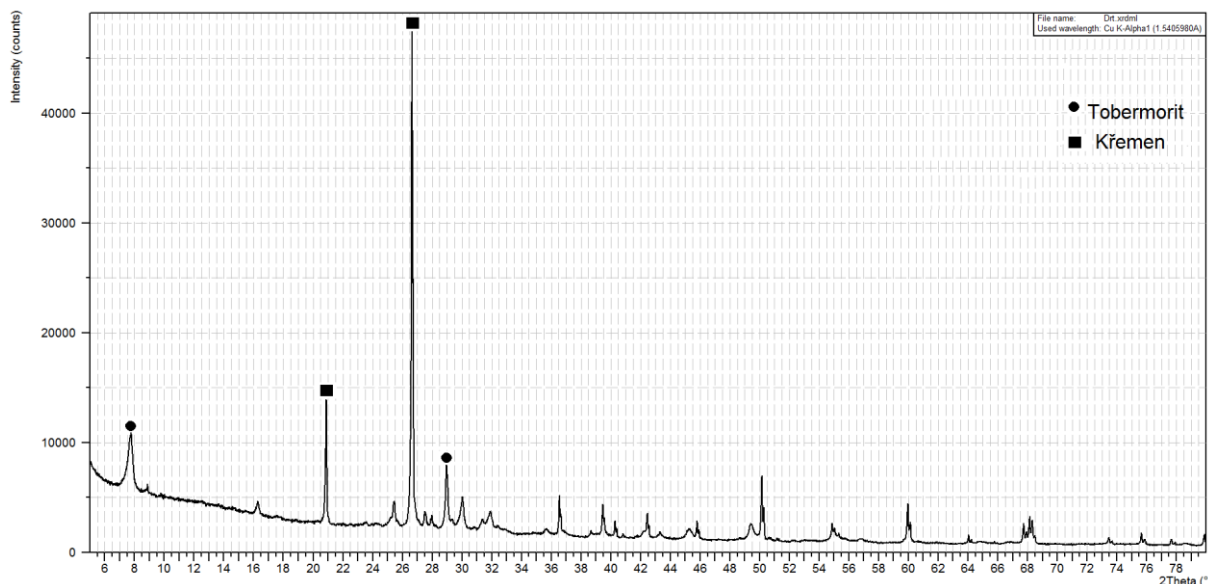
Graf 1 - Křivka zrnitosti pórobetonové drti frakce 0-2 mm

Tabulka 15 - Fyzikálně-mechanické vlastnosti drtě různé granulometrie

Drť frakce	Nasákavost [% hmotnostních]	Sypná objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Odolnost proti drcení [MPa]
0-2 mm	117	620	13
0,25-2 mm	103	500	7

Při porovnání vlastností totožní drti zbavené jemné frakce vidíme pokles všech zjišťovaných fyzikálně-mechanických vlastností. Rozdíly v nasákavosti a sypné objemové hmotnosti přitom nejsou tak markantní jako rozdíl při zkoušce odolnosti proti drcení. Důvodem zvýšené nasákavosti je zvýšený podíl jemné frakce kameniva, tudíž zvětšení měrného povrchu, který může absorbovat více vody. Sypná objemová hmotnost je u drtě s frakcí 0-2 mm větší z obdobného důvodu. Jemné podíly zaplňují otevřené póry hrubších frakcí, to má za následek zvýšení sypné objemové hmotnosti. Důvodem malého rozdílu jsou uzavřené póry, které se v pórobetonové struktuře vyskytují především. Do těchto pórů se voda i jemnější částice dostávají hůře.

U odolnosti proti stlačení jsou to právě uzavřené póry, které o tolik snižují pevnost matrice. V případě drtě s jemnou frakcí se matrice zhutní a více odolává tlaku.



XRD 1 – Drť frakce 0-2 mm

Majoritní část mineralogického složení používané pórobetonové drti vytvořené z pískového pórobetonu s příměsí fluidního popílku tvoří tobermorit a křemen. Vysoký obsah křemene je důsledkem nízké rozpustnosti křemičitého písku. Pík portlanditu se v rentgenogramu nevyskytuje, prostředí tedy bylo dostatečně

nasycováno Si^{4+} ionty a portlandit byl spotřebován při tvorbě CSH fází. Ty následně krystalizovali na tobermorit, jehož píky jsou v rentgenogramu patrné.

9.1 Komparace vlastností drtě s komerčními kamenivý

Pomocí vybraných zkoušek byly stanoveny podstatné mechanicko-fyzikální vlastnosti pórobetonové drti. Výsledné vlastnosti byly porovnány s komerčně vyráběnými kamenivý (popílkový agloporit, keramzit, expandovaný perlit a cihelná drť).

Tabulka 16 - Srovnání vybraných výsledků pórobetonové drtě s komerčními kamenivý

	Nasákavost [% hmotnostních]	Sypná objemová hmotnost [MPa]	Odolnost proti drcení [MPa]
Pórobetonová drť (0-2 mm)	100 - 120	620	13
Popílkový agloporit (0-4 mm)	8-30	700-900	2-8
Keramzit (0-4 mm)	10-20	480-900	2,8-4
Expandovaný perlit (0-2 mm)	až 300	70-350	0,14-0,4
Cihelná drť (netříděná frakce)	14-35	700-1200	-

Největší nasákavost z lehkých kameniv má vzhledem ke svému měrnému povrchu a otevřené pórovitosti expandovaný perlit. Podobně pórovitá struktura pórobetonové drtě a velká jemnost má za následek také poměrně vysokou nasákavost. Naopak spěkaná kameniva, která mají uzavřené póry a na povrchu jsou slinutá (agloporit, keramzit) mají nasákavost podstatně menší. Při používání pórobetonové drti jako kameniva, je tedy nutno brát zřetel na nárůst vodního součinitele. Vliv na nasákavost má i rozdílná sypná objemová hmotnost. Perlit díky své otevřené pórovitosti a jemnosti má sypnou objemovou hmotnost nejnižší, naopak slinuté kusy cihelné drtě mají nejvyšší sypnou hmotnost. Nakonec odolnost proti vyšlá nejlépe právě u pórobetonové drtě, nejmenší pak byla u expandovaného perlitu. To je zapříčiněno zhuštěním poměrně široké frakce pórobetonu ve válci, kdy otevřené póry větší frakce vyplnila frakce menší. Na rozdíl od perlitu, který i přes vibrování formy zůstává nakypřený. V případě ostatních kameniv vyšla odolnost proti drcení menší, než u pórobetonové drti z důvodu větší frakce kameniva a menšího obsahu jemných podílů. Samotná pevnost zrna je však u spěkaných kameniv větší, než pevnost zrna pórobetonové drtě. Pórobetonovou drť je možno použít jako lehké kamenivo do betonu, nebo jako lehké zásypové kamenivo.

10 ETAPA II – ROZBOR SUROVIN A PŘÍPRAVA VZORKŮ

Etapa II se zabývá popisem výroby vzorků, autoklávováním a hodnocením vzniklých vzorků.

10.1 Chemický rozbor

Pro výrobu a vyhodnocování jednotlivých vzorků byly použity vstupní suroviny dodané z výrobního závodu na pískový pórobeton.

Na vstupních surovinách byl provedený chemický rozbor, pro zjištění množství jednotlivých oxidů. Rozbor jednotlivých surovin provedla firma Eurofins bel/novamann s.r.o, kromě rozboru pórobetonové drtě, který provedla firma ALS Czech Republic s.r.o. V tabulce jsou vyjádřeny hodnoty nejdůležitějších oxidů v %, u pórobetonové drti v % suš.

Tabulka 17 - Chemické složení vstupních surovin

	Pálené vápno	Cement	Křemičitý písek	Fluidní popílek	Pórobetonová drť
Volné CaO	92	-	-	-	-
Celkové CaO	95,62	64,25	0,23	17,67	20,6
SiO ₂	-	19,97	92,91	38,05	56,4
Al ₂ O ₃	-	5,4	2,53	24,67	5
Fe ₂ O ₃	-	3,06	0,84	5,82	1,28
SO ₃	0,07	2,66	0,02	5,44	2,57 *
Ztráta žíháním	3	0,89	0,56	3,18	-

* Síran jako SO₄²⁻

Z tabulky je zřejmé, že pórobetonová drť do směsi přináší jak velké množství SiO₂, tak i část CaO. Náhradou písku pórobetonovou drtí se tedy zvýší poměr C/S což může mít do značné míry příznivý vliv na mechanicko-fyzikální vlastnosti výsledného pórobetonu. Pro přesnější vyhodnocení by však bylo potřeba zjistit, zda SiO₂ obsažený v pórobetonové drti je ve formě amorfni nebo krystalické.

10.2 Receptury

Základní poměr jednotlivých surovin byl přizpůsoben skuteční surovinové skladbě pórobetonu ve výrobním závodě. Vzhledem k tomu, že cílem zkoušek byla syntéza tobermoritu, nikoli výroba pórobetonové hmoty, nebyl použit hliníkový prášek.

Tabulka 18 - Procentuální zastoupení jednotlivých surovin v záměs

	Vápno [%]	Cement [%]	Fluidní popílek [%]	Písek [%]	Síran [%]
F	11,05	16,58	6,91	62,17	3,29
V	17,96	16,58	-	62,17	3,29

Vysvětlivky: F – vzorky s příměsí fluidního popílku, V – vzorky na bázi vápna

Ze vstupních surovin byly vytvořeny následující receptury: retenční, s příměsí fluidního popílku a drtí frakce 0-2 mm, s příměsí fluidního popílku a drtí frakce 0-0,2 mm, bez příměsí fluidního popílku s drtí 0-2 mm a bez příměsí fluidního popílku s drtí 0-0,2 mm. Pórobetonová drť je použita jako (10%, 20%, 30% a 40%) náhrada křemičitého písku.

Vytvořené autoklávované kompozity lze rozdělit podle množství a druhu vstupních surovin do čtyř hlavních skupin:

F – Vzorky s příměsí fluidního popílku a náhradou pórobetonové drti frakce 0-2 mm

MF – Vzorky s příměsí fluidního popílku a náhradou pórobetonové drti frakce 0- 0,2 mm

V – Vzorky bez příměsí fluidního popílku a náhradou pórobetonové drti frakce 0-2 mm

MV – Vzorky bez příměsí fluidního popílku a náhradou pórobetonové drti frakce 0-0,2 mm

10.3 Postup výroby

Pro přípravu vzorků 20x20x100 mm byla použita ocelová trojforma (natřena separačním olejovým filmem).

Všechny záměsi měly konstantní množství vápna, cementu, fluidního popílku/vápna a síranu. Měnil se pouze obsah křemičitého písku, který se nahrazoval

pórobetonovou drtí. Náhrada drti byla pro každou skupinu 10, 20, 30 a 40 % hmotnostních.

Jednotlivé suroviny byly naváženy na laboratorních vahách s přesností na 0,1 g. Následně byly všechny složky homogenizovány v misce. Po 10 minutách míchání se postupně přilévala voda a to až do vytvoření konzistence plastického těsta. Vzniklá směs se 5 minut míchala.

Směs se plnila do poloviny ocelových trojforem. Následovalo hutnění 2×10 rázy (z výšky 5 cm). Formy se s přesahem doplnily a zhutnily stejným způsobem.

Po 24 hodinách se vzorky odformovaly a umístily do autoklávovacích kapslí. Samotné autoklávování probíhalo 12 hodin při teplotě 190 °C. Temperování komory na 190 °C probíhalo přibližně 20 minut. Chlazením bylo pozvolné a trvalo 8 hodin. Doba autoklávování byla zvolena jako pilotní. V případě dalšího řešení bude brán zřetel na zkrácení doby hydrotermální reakce. Autoklávované vzorky se následně na 24 hodin umístily do sušárny.

Následně byla na vzorcích stanovena objemová hmotnost a provedena zkouška pevnosti v tlaku. Na rozdrcených vzorcích se následně provedla XRD difrakční analýza a vytvořily se snímky pomocí SEM.

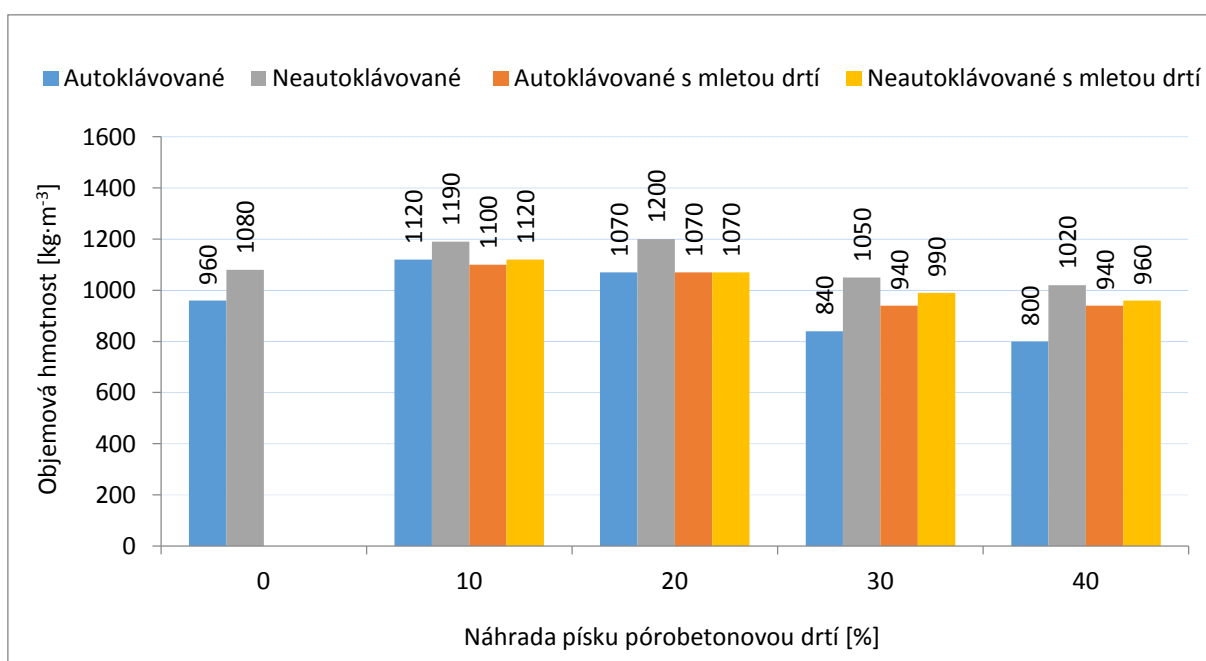
11 ETAPA III – ANALÝZA VZORKŮ

V etapě III budou jednotlivé vytvořené vzorky autoklávovaných kompozitů srovnávány mezi sebou. Cílem bude stanovit směs, která bude vyhovovat z hlediska obsahu tobermoritu, tak i z hlediska fyzikálně-mechanických parametrů.

11.1 Fyzikálně-mechanické vlastnosti

Tato část se zabývá vyhodnocením objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku autoklávovaného kompozitu.

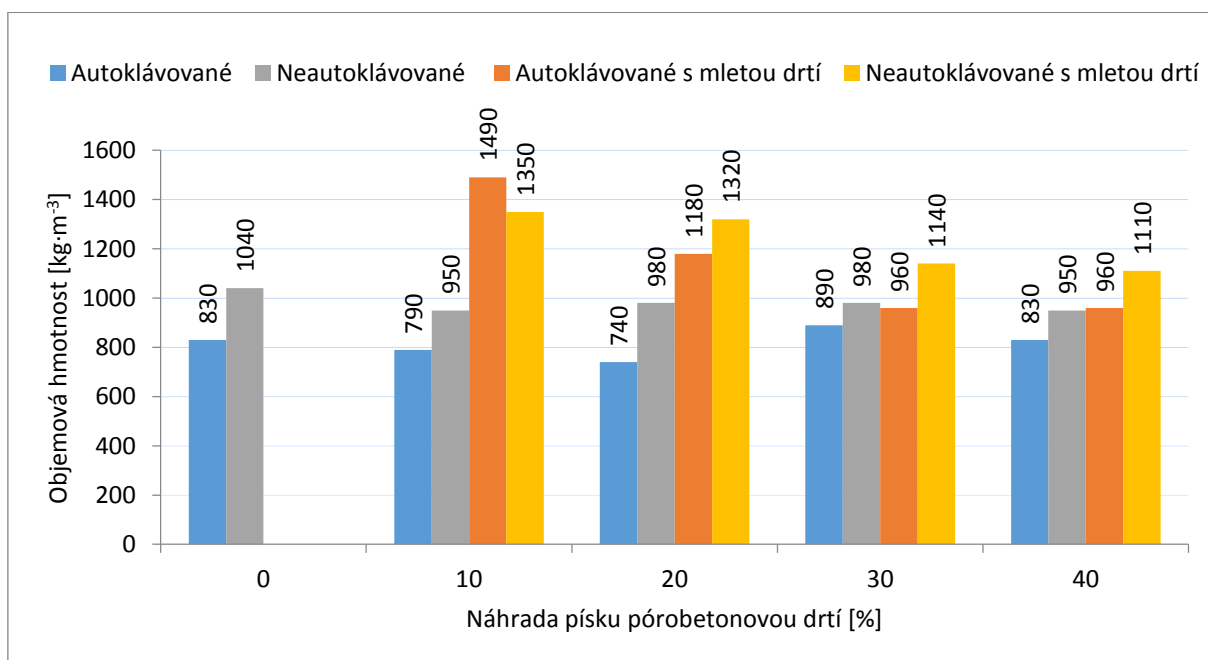
11.1.1 Objemová hmotnost



Graf 2 - objemových hmotností vzniklých procesem autoklávování, vzorky s příměsí fluidu

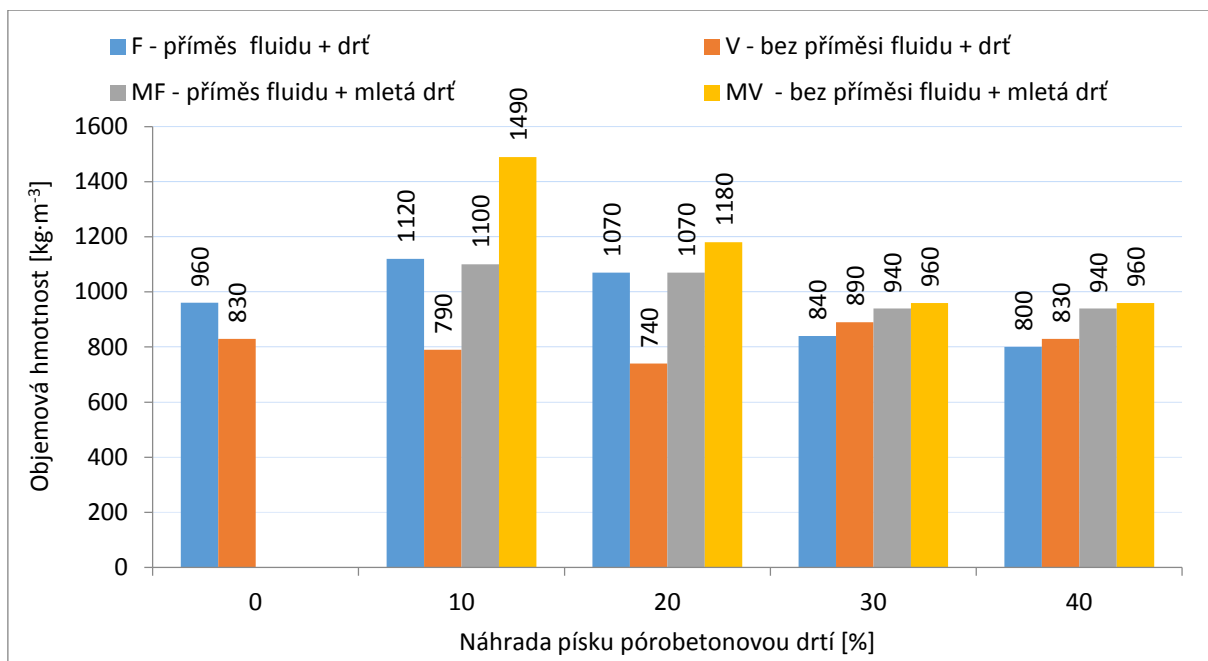
Z naměřených hodnot uvedených v grafu 2 lze usuzovat, že objemová hmotnost neautoklávovaných vzorků je výrazně větší než u vzorků autoklávovaných. Důvodem je vznik pórovitější struktury u autoklávovaných vzorků, vlivem sycení vzorků vodní parou a prorůstáním struktury novými minerály. Po vytažení z autoklávu bylo okem evidentně vidět zvětšení objemu vzorků. Můžeme si všimnout, že vzorky s hrubější frakcí pórobetonové drtí mají menší objemovou hmotnost než vzorky s drtí mletou. Pórobetonová drť frakce 0-2mm může částečně fungovat i jako lehčené kamenivo a snižovat tak objemovou hmotnost. Naopak vzorky s jemnější drtí jsou

kompaktnější, v tomto případě zrna drti částečně vyplňují vzniklé póry. Nejmenší objemovou hmotnost $800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ měl vzorek autoklávovaný s množstvím 40% drtě (frakce 0-2 mm). Největší objemovou hmotnost má neautoklávovaný vzorek s 20% množstvím drtě (frakce 0-2 mm).



Graf 3 - Posouzení objemových hmotností vzniklých procesem autoklávování vzorky bez příměsi fluidu

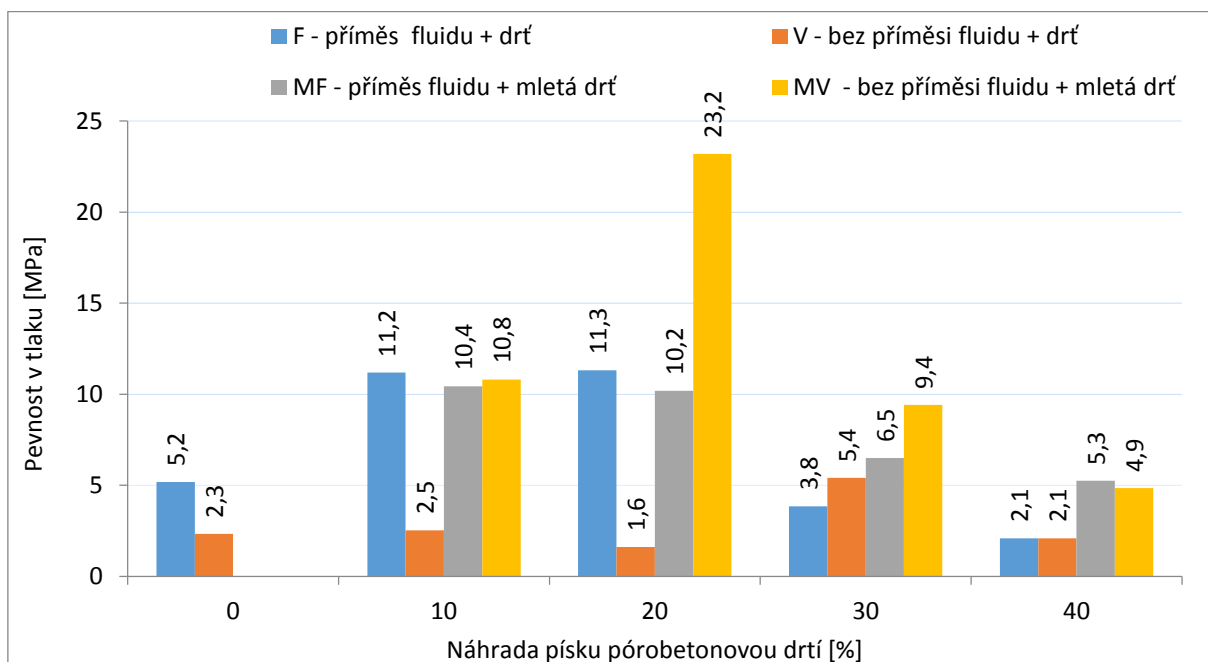
Z naměřených hodnot uvedených v grafu 3 je patrné podobně jako u grafu 2, že neautoklávované vzorky mají vyšší objemovou hmotnost než vzorky autoklávované. Stejně tak je vidět, že vzorky s hrubší frakcí drtě mají stejně jako u grafu 1 výrazně menší objemovou hmotnost než vzorky s mletou drtí. S přibývajícím množstvím drtě se tento rozdíl snižuje. Důvody jsou obdobné jako u vzorků s fluidním popílkem. Pórobetonová drť zde může fungovat částečně jako lehčené kamenivo. Nejmenší objemovou hmotnost $740 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ zde má autoklávovaný vzorek s 20% náhradou drtí (frakce 0-2 mm). Největší objemovou hmotnost $1490 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ má autoklávovaný vzorek s 10% náhradou drtí (frakce 0-0,2 mm).



Graf 4 - Závislost objemové hmotnosti na množství drti

V grafu 4 je vidět, že největší objemové hmotnosti mají vzorky s mletou drtí bez fluidního popílku (MV), naopak nejmenší objemové hmotnosti mají vzorky s drtí hrubou bez fluidního popílku (V). Objemová hmotnost u vzorků s hrubou drtí s fluidním popílkem (F) při použití 10 % drtě roste, následně však klesá, ve větším množství zde totiž pórobetonová drť začíná plnit funkci lehčeného kameniva. V případě vzorků s mletou drtí s fluidním popílkem (MF) objemová hmotnost vzroste, jemněji namletá drť vyplní větší póry, po 30 % je už ale opět nižší než u referenčních vzorků. Podobně jsou na tom i vzorky MV. V případě vzorků V hraje roli větší obsah vápna, které tvoří pórovitější strukturu vzorku. Zvětšením obsahu póru, společně s pórobetonovou drtí do 20 % vzniká pórovitější struktura, tudíž klesá objemová hmotnost. Nejmenší objemovou hmotnost $740 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ měl vzorek V20, největší objemovou hmotnost $1490 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ měl vzorek MV10. V případě vzorku MV10 mohla nastat chyba při přípravě nebo vyhodnocování. Vybočuje totiž razantně z trendu ostatních vzorků.

11.1.2 Pevnost v tlaku



Graf 5 - Závislost pevnosti na množství drti

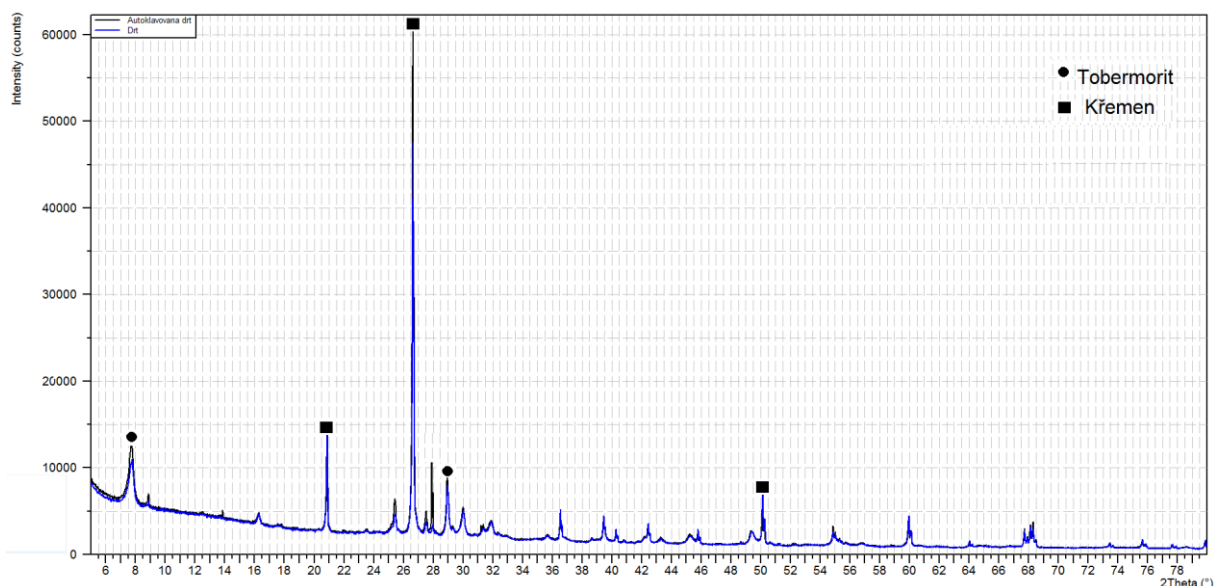
Nejnižší pevnosti měli vzorky s hrubou drtí bez fluidního popílku (V), důvodem je nízká objemová hmotnost. Vzorky byly nejvíce pórovité a s rostoucí pórovitostí výrazně klesá pevnost. Vzorky s hrubou drtí a fluidním popílkem (F) byly celkově více kompaktní. Obecně pevnější byly vzorky s pórobetonovou drtí frakce 0-0,2 mm. Důvodem je právě vyplnění části kompozitu struktury pórobetonovou drtí. S rostoucím obsahem drti však pevnost postupně klesala, snižoval se totiž obsah krystalického SiO_2 obsaženého právě v písku. Důsledkem snižování obsahu SiO_2 se zároveň snížilo množství vytvářeného CSH gelu, čímž nevznikala tak pevná struktura jako u předešlých vzorků. Největší pevnost 23,2 MPa měl vzorek MV20, nejmenší pevnost 1,6 MPa měl vzorek V20. U vzorku MV20 mohla nastat chyba v měření, extrémně totiž vybočuje z průměru zbylých měření.

Příměs pórobetonové drti měla téměř vždy pozitivní dopad na pevnost a její hodnoty byly při náhradě 10 a 20 % až dvojnásobné. Maximální množství náhrady v případě drti 0-2 mm je 20 % v případě směsi s příměsí fluidního popílku a 30 % v případě směsi na bázi vápna. Maximální množství náhrady v případě mleté drtě je až 40 %, kdy jsou pevnosti stále minimálně srovnatelné s referenčními. Výhodnou variantou pro oba typy drti je 20% náhrada.

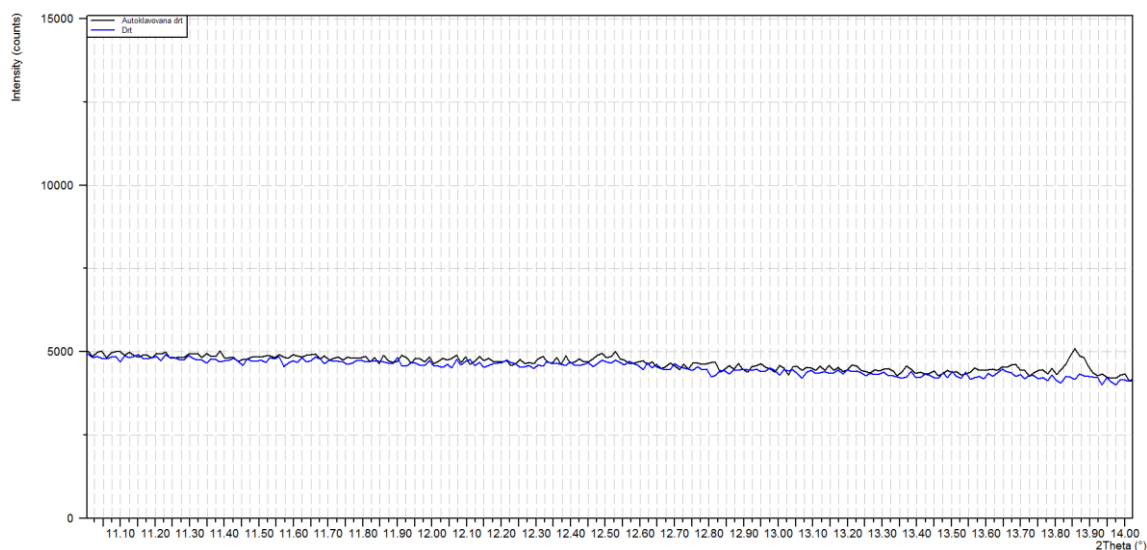
11.2 Mikrostruktura testovaných kompozitů

Na úvod hodnocení mikrostruktury kompozitů bylo nejdříve zvoleno hodnocení struktury samotné vstupní drtě před a po hydrotermální reakci. Původní drť byla autoklávována při stejných podmínkách jako vzorky na bázi vápna a směsi vápna s fluidním popílkem. Následuje vyhodnocení vzorků s obsahem fluidního popílku a vzorků bez příměsi. Ze získaných výsledků byly následně vybrány vzorky, které se prohlíželi pomocí elektronového mikroskopu. Záměrem bylo zjištění vnitřní struktury autoklávovaných kompozitů a dějů v nich probíhajících.

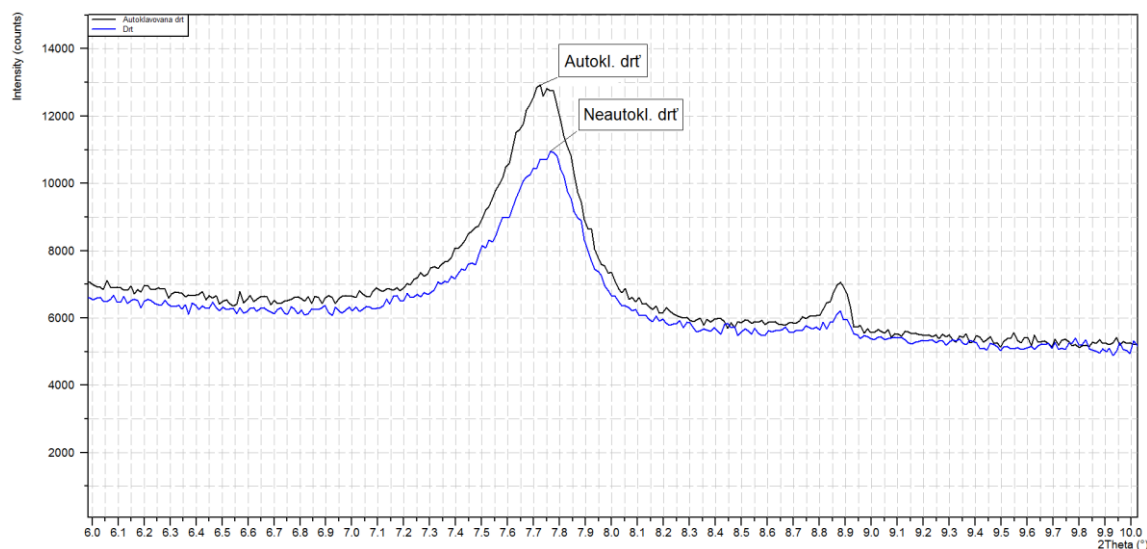
11.2.1 XRD analýza



XRD 2 - rentgenogram pórobetonové drti autoklávované (černá) a neautoklávované (modrá). Vyznačení minerálů.

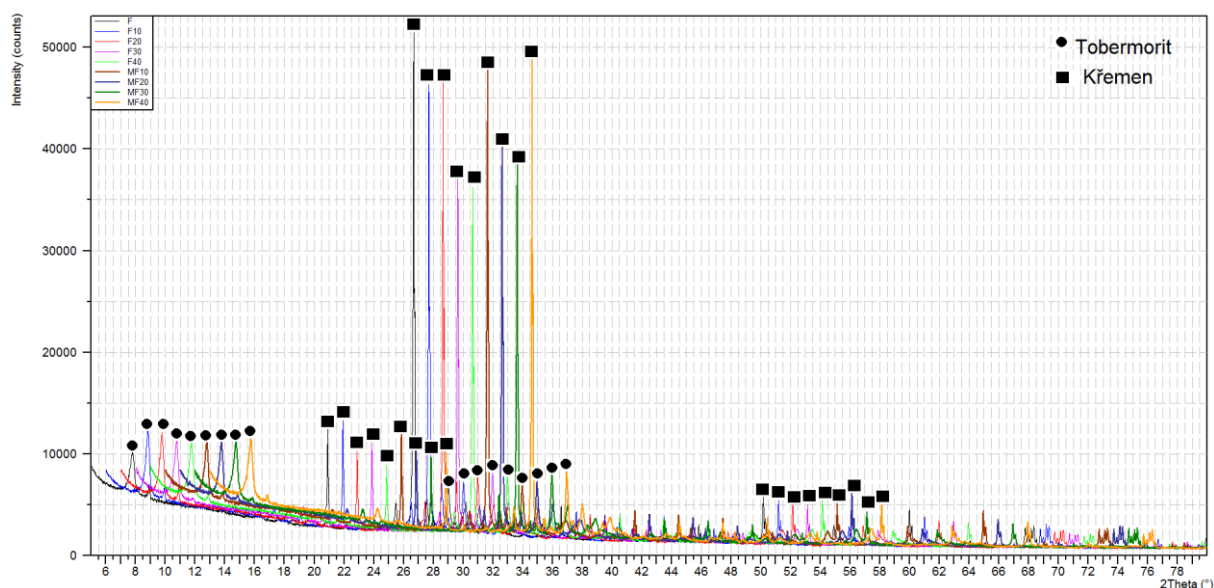


XRD 3 - Přibližný rentgenogram píku xonotlitu

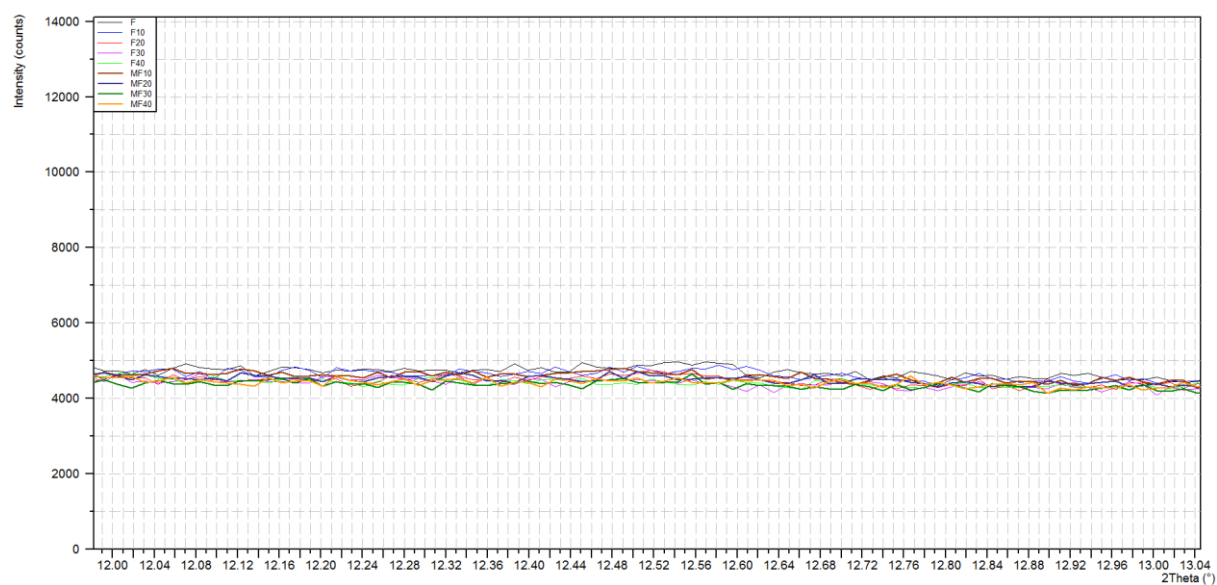


XRD 4 - Přibližný rentgenogram píku tobermoritu

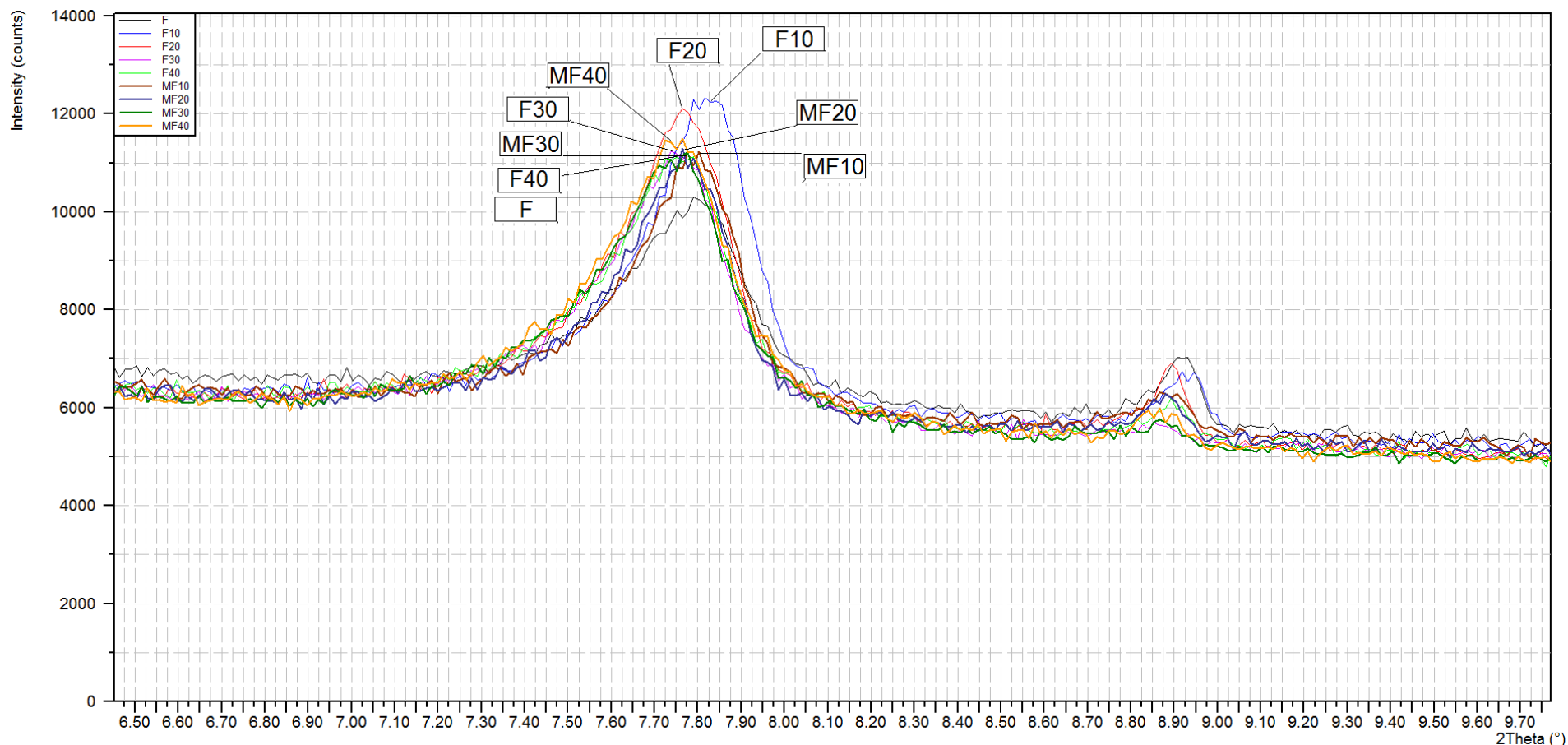
Majoritní část mineralogického složení pórobetonové drti použité pro výrobu kompozitů i drti po autoklávování tvoří píky křemene a tobermoritu. Přičemž opětovným procesem autoklávování roste množství tobermoritu, xonotlit nebyl identifikován. Jeho výskyt lze předpokládat spíše po 20 hodinách hydrotermální reakce. Avšak i po delším autoklávování zůstává obsah tobermoritu nižší než obsah křemene. Ten tak mohl vzniknout buď opětovnou rekrystalizací, nebo také pokud byla jeho rozpustnost příliš nízká pro další tvorbu CSH fází a krystalizaci tobermoritu.



XRD 5 – Kombinace rentgenogramů vzorků s fluidním popílkem autoklávovaných při teplotě 190 °C



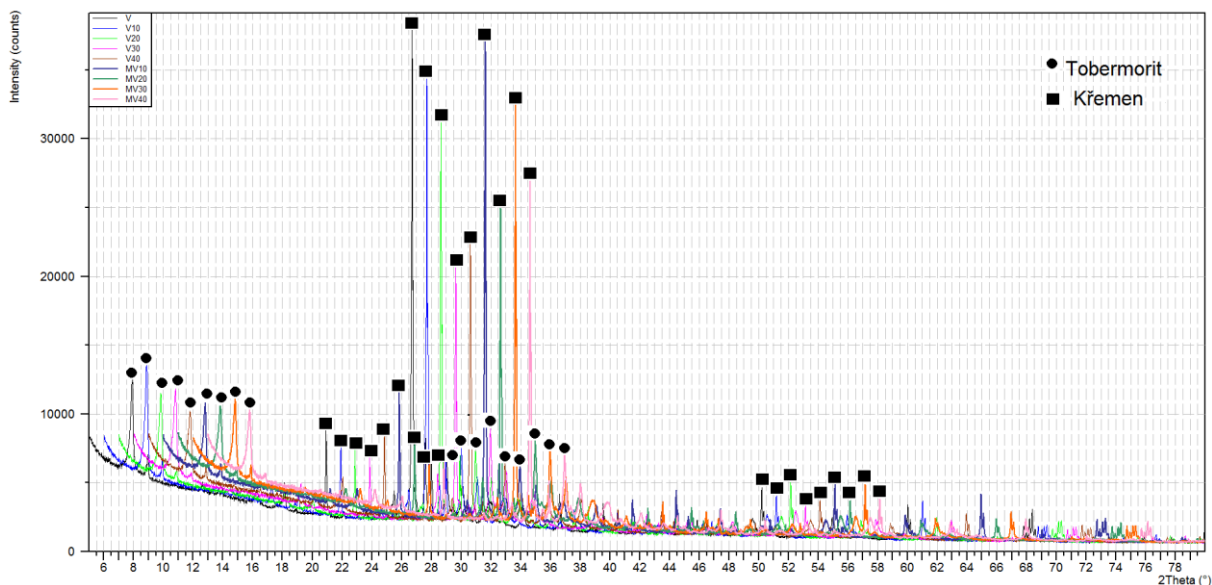
XRD 6 – Kombinace rentgenogramů vzorků s fluidním popínkem autoklávovaných při teplotě 190 °C, přiblížení oblasti výskytu xonotlitu



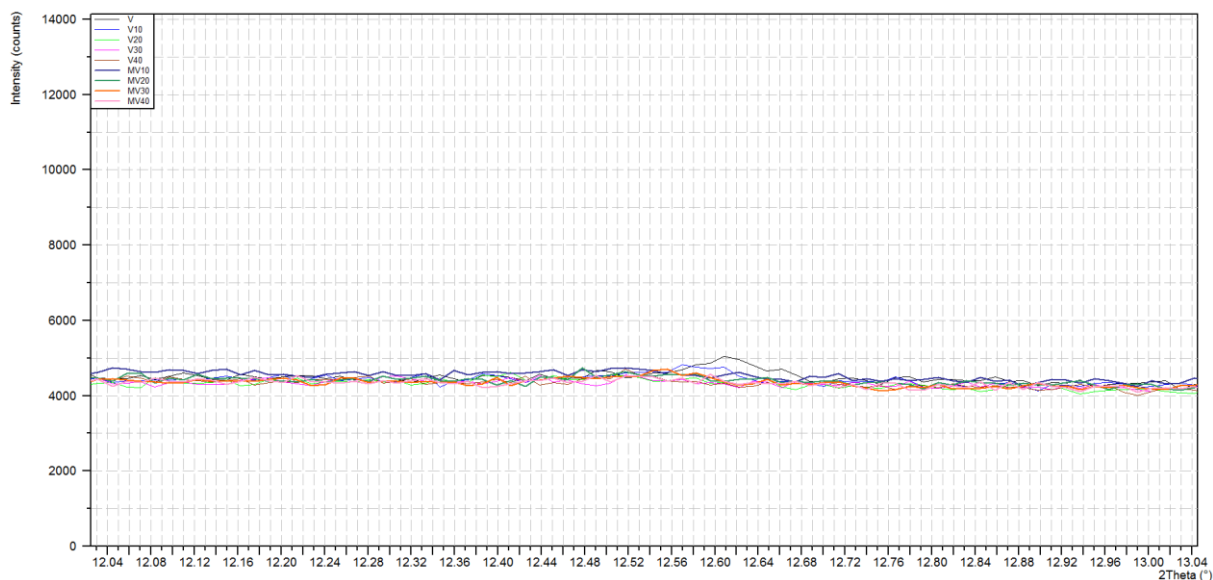
XRD 7 - Kombinace rentgenogramů vzorků s fluidním popílčkem autoklávovaných při teplotě 190 °C, přiblížení oblasti výskytu tobermoritu

Největší pík tobermoritu má vzorek s hrubou drtí (F10) a naopak nejmenší pík má referenční vzorek (F). Z toho vyplývá, že příměs pórobetonové drti měl vždy pozitivní vliv na podíl tobermoritu ve vzorku. Z rentgenogramu je vidět, že po překročení 10 % náhrady písku drtí klesá množství tobermoritu ve vzorku. Z toho vyplývá, že nahrazováním křemičitého písku drtí má na obsah tobermoritu vliv. Podíl SiO_2 v pórobetonové drti je oproti křemičitému písku významně nižší a zvyšuje tak molární poměr C/S.

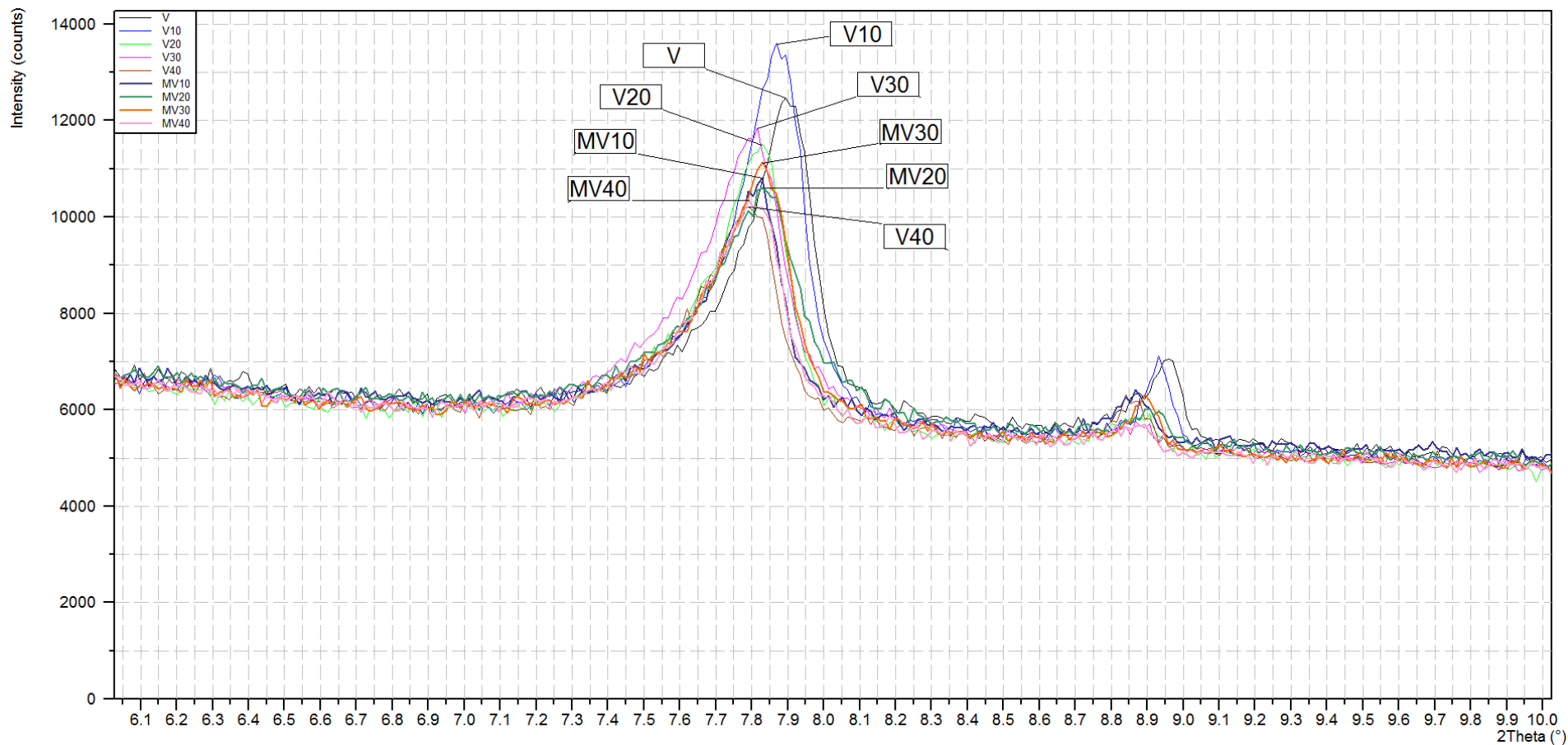
Majoritní část mineralogického autoklávovaných kompozitů s příměsí fluidního popílku tvoří tobermorit a křemen. Z rentgenogramu je zřejmé, že snižováním obsahu křemičitého písku se snižují i píky křemene. U vzorku MF40 je trend opačný, to může být zapříčiněno chybou při výrobě zkušební vzorku kompozitu, nebo chybou měření. Xonotlit dalším procesem autoklávování pórobetonové drti nevzniká.



XRD 8 – Kombinace rentgenogramů vzorků bez fluidního popílku autoklávovaných při teplotě 190 °C



XRD 9 – Kombinace rentgenogramů vzorků bez fluidního popílku autoklávovaných při teplotě 190 °C, přiblížení oblasti výskytu xonotlitu



XRD 10 - Kombinace rentgenogramů vzorků bez fluidního popílku autoklávovaných při teplotě 190 °C, přiblížení oblasti výskytu tobermoritu

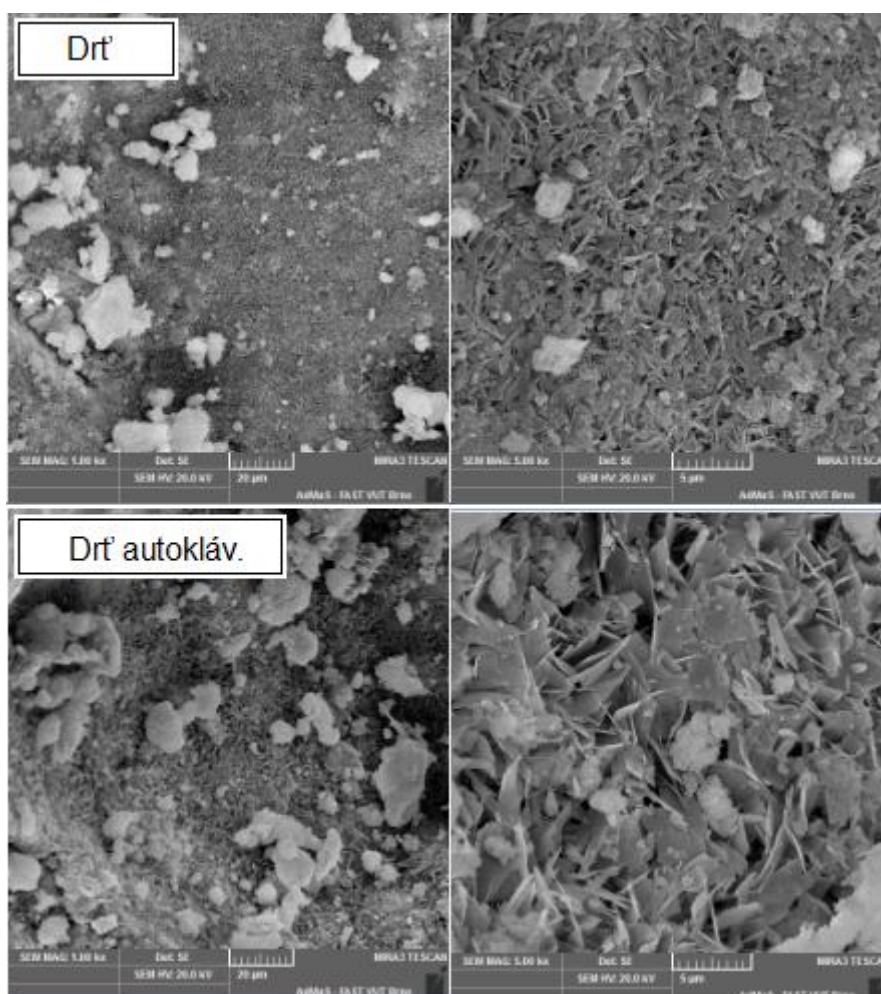
U vzorků bez příměsi fluidního popílku je průběh podobný, nicméně o něco markantnější. Největší pík tobermoritu má vzorek s hrubou drtí (V10), další vzorky mají tobermorilu dokonce méně než vzorek referenční. Z toho vyplývá, že CaO obsažené ve vzorcích nemá s čím reagovat. Nahrazováním křemičitého písku drtí se snížil obsah SiO_2 a tím neumožňujeme další vznik tobermoritu. Xonotlit ani v tomto případě nevzniká. Majoritními jsou opět píky tobermoritu a křemene. Veškerý portlandit byl spotřebován při výrobě CSH fází, které následně vykrytalizovaly na tobermorit.

Ze získaných hodnot vyplývá, že nahrazování křemičitého písku pórobetonovou drtí je možné. Aby nebyl ovlivněn vznik nového tobermoritu, je možné nahradit křemičitý písek maximálně 10 % pórobetonové drti. U vzorků s příměsí fluidního popílku pak 20 %.

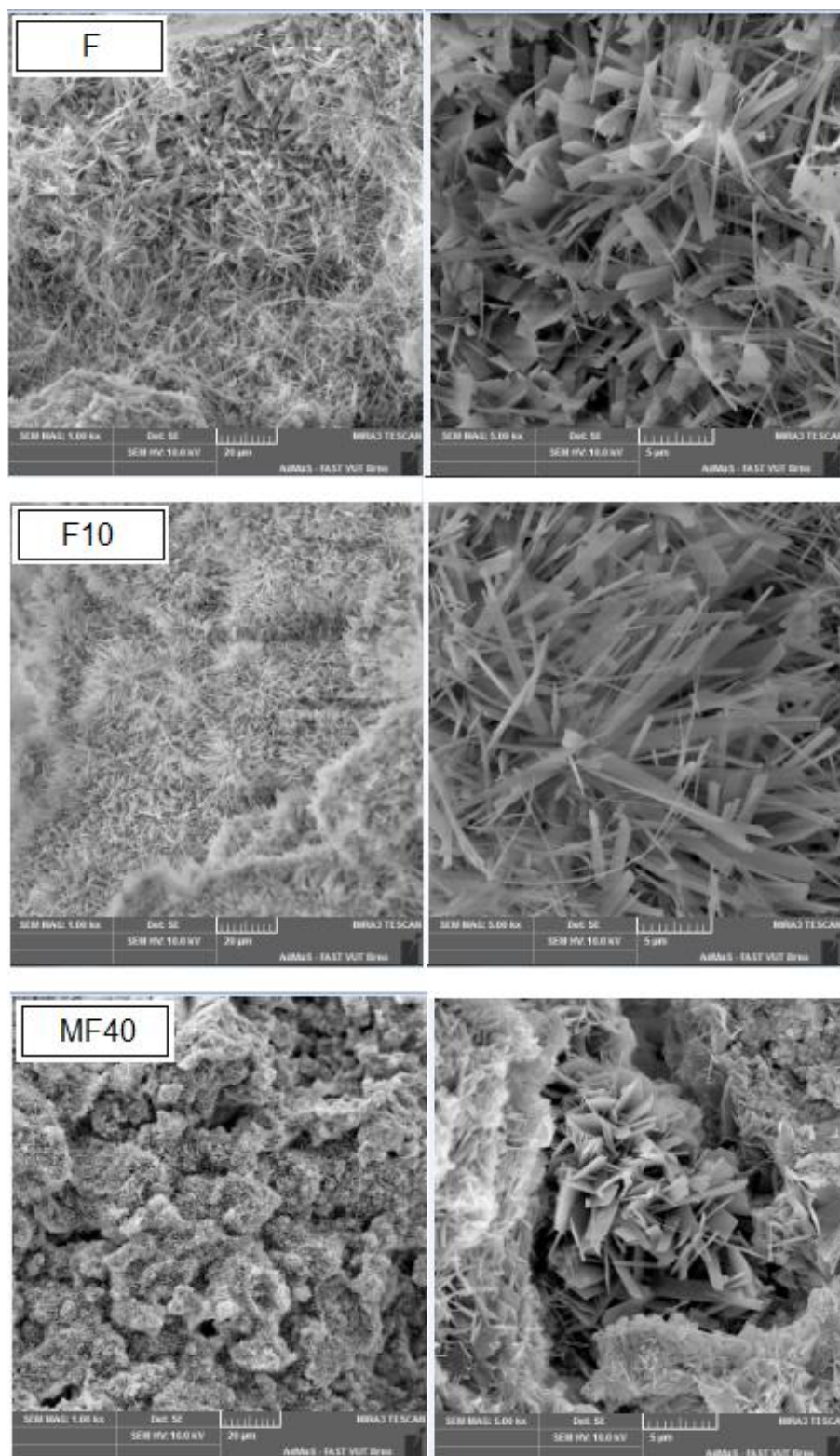
Vzorky s fluidním popínkem totiž sníží obsah CaO (vápna) a naopak vzroste obsah SiO₂ (popílek). Díky tomu dochází k optimálnímu sycení ionty SiO⁴⁺ a tvorbě CSH fází schopných syntézy na tobermorit.

11.2.2 Elektronová mikroskopie

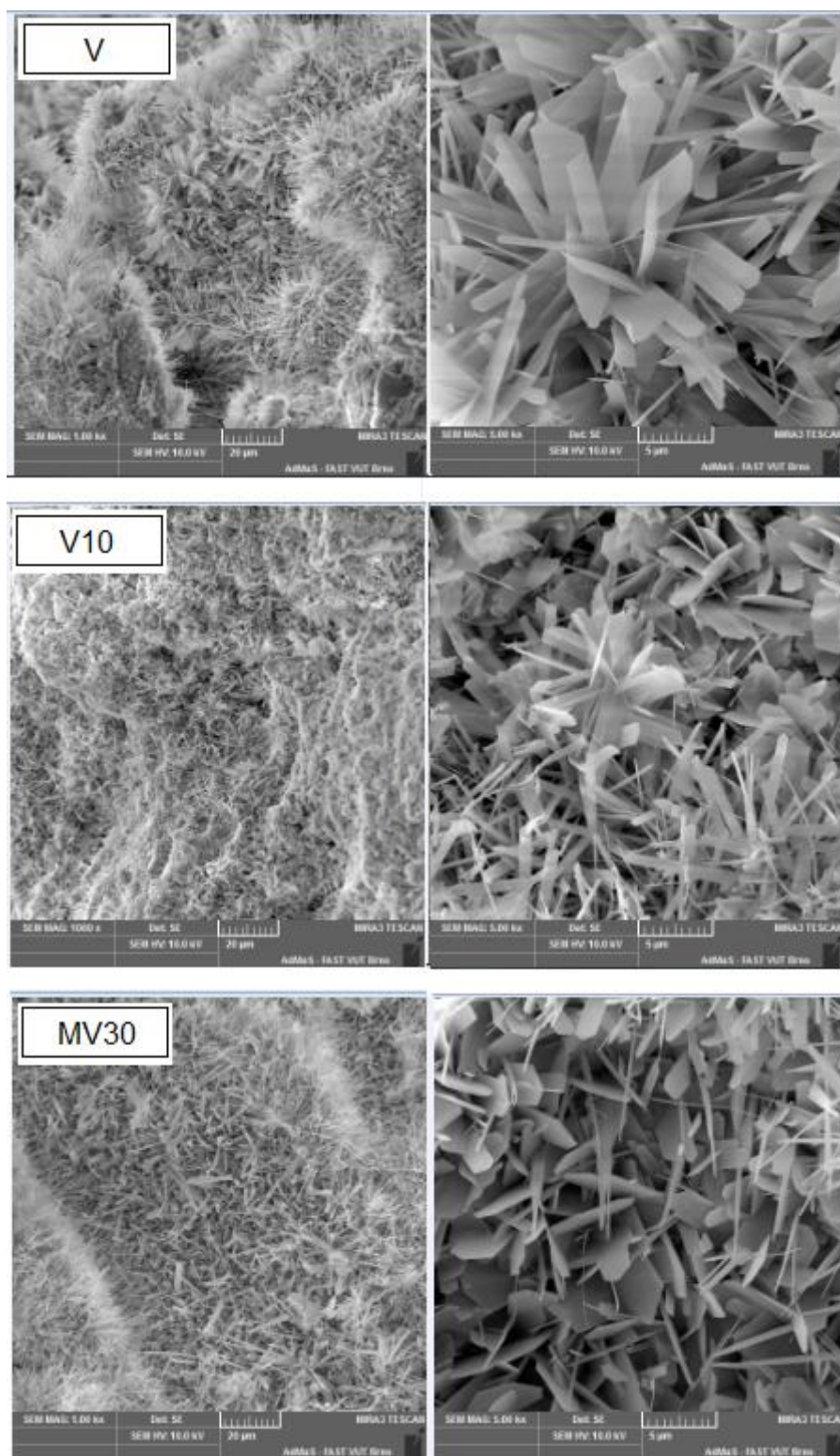
Pro elektronovou mikroskopii byly vybrány jen nejzajímavější vzorky pórobetonové drtě. Byly to vzorky retenční a pak vzorky s největším a nejmenším píkem tobermoritu. Na obrázcích jsou jednotlivé vzorky zvětšeny na levé straně 1000 × na pravé straně 5000 ×.



Obrázek 208 – SEM snímky pórobetonové drti frakce 0-2 mm před autoklávováním a po autoklávování 12 hodin při teplotě 190 °C.



Obrázek 39 - SEM snímky kompozitů s fluidním poplínkem. S odlišným množstvím a granulometrií pórobetonové drtě. Autoklávovaných 12 hodin při teplotě 190 °C.



Obrázek 40 - SEM snímky kompozitů bez fluidního popílku. S odlišným množstvím a granulometrií pórobetonové drtě. Autoklávovaných 12 hodin při teplotě 190 °C.

Vlivem drcení u vzorků pórobetonové drtě jsou krystaly poničené. Je však patrné, že po opětovném zautoklávování drtě se vzhled krystalů zlepšil. Krystaly vypadají delší a širší než u neautoklávované drtě. To je zapříčiněno nově vzniklým tobermoritem, jehož nárůst lze sledovat na vyšší intenzitě píku tobermoritu v XRD 2.

Analýza mikrostruktury pomocí REM poukazuje na vliv příměsi fluidního popílku. Při porovnání vzorků V a F je zřejmé, že na snímcích F je krystalů tobermoritu vytvořených více. Vzorky V, kde se fluidní popílek nevyskytuje, obsahovali více krystalické fáze, krystaly tobermoritu byly širší. Zároveň kvůli obsahu fluidního popílku ve vzorcích F byly krystaly tobermoritu špičatější a delší než u vzorků V. To je zapříčiněno rychlejší tvorbou krystalu tobermoritu, kterou způsobuje popílek.

Po přidání pórobetonové drti do matrice autoklávovaného kompozitu obsahovaly vzorky F10 více krystalů tobermoritu, než vzorky referenční. Obdobně tomu bylo i u vzorků V10. S rostoucím obsahem drtě je možné sledovat zmenšení krystalů tobermoritu, krystaly jsou užší a spíše lístečkovité.

Ze snímků mikrostruktury je patrné, že s rostoucím množstvím drtě se snižuje množství krystalické fáze, naopak roste amorfni fáze vzorků.

12 ZÁVĚR

Výroba pórobetonu je v dnešní době až do procesu autoklávování bezodpadová. Po nakypření směsi se přerosty seříznou a rozplaví. Vzniklý přerostový kal se následně použije v nové záměsi. Odpad ve výrobě vzniká až po autoklávovacím procesu, kdy mohou vznikat nevyhovující výrobky. Dnešním trendem jsou bezodpadové technologie. Důvod je jak ekologický, tak ekonomický. Je tedy snaha pórobetonový odpad podrtit na určitou frakci a přidat do výrobní směsi jako náhradu některé z hlavních surovin. Ohled se přitom musí brát hlavně na vznik tobermoritu, který určuje mechanicko-fyzikální vlastnosti pórobetonu.

V rámci práce bylo zjištěno, že pórobetonová drť je použitelná jako lehčené kamenivo. Její využití bude blízké způsobu použití perlitu. Je však nutné počítat stejně jako u perlitu s vyšší nasákavostí. Tento problém by se mohl částečně vyřešit odstraněním jemnějších frakcí drtě. Pro přesnější určení vlivu pórobetonové drtě jako kameniva na cementovou matici by však bylo nutné experimentální ověření. Vhodné by bylo i otestování fyzikálně-mechanických vlastností komerčních kameniv v laboratoři, nejenom porovnáním s obecně zjištěnými vlastnostmi.

Z výsledků druhé a třetí etapy vyplývá, že nahrazování křemičitého písku pórobetonovou drtí je možné. Snímky rentgenogramu ukázaly, že pokud je nahrazeno 10 % křemičitého písku pórobetonovou drtí obsah tobermoritu se zvýší. To znamená, že vzniklo alespoň takové množství tobermoritu jako ve vzorcích referenčních. Větší množství drti má za následek menší množství nově vytvořeného tobermoritu. To je způsobeno absencí krystalického SiO_2 , které je obsaženo v křemičitém písku. Pozitivnějších výsledků se v tomto ohledu dosáhlo u vzorků s příměsí popílku, protože se snížil obsah CaO (vápna) a naopak se zvýšil obsah amorfního SiO_2 (popílku). Přínosem je zjištění, že i po opakovaném autoklávování pórobetonové drti obsažené ve vzorcích nevznikal z tobermoritu xonotlit. Elektronová mikroskopie potvrdila závěry XRD analýzy a prokázala přírůstek krystalů tobermoritu po přidání 10 % pórobetonové drti.

Fyzikálně-mechanické vlastnosti se při použití 10 % drti změny jen málo. Objemová hmotnost sice vzroste, s ní se ale zvýší pevnost v tlaku.

Z ekonomického i ekologického hlediska je však náhrada křemičitého písku pórobetonovou drtí velmi výhodná.

Pro přesnější vyhodnocení by bylo vhodné ověřit závěry na větším množství zkušebních těles. Eliminovaly by se tím případné chyby v měření. Pro další výzkum této oblasti je možná doporučit ověření různých molárních poměrů C/S, dalších teplot hydrotermální reakce, ověření možnosti zkrácení či prodloužení izotermické výdrže, a to především ověření vybraného souboru směsí v pórobetonové struktuře rozměrnějších vzorků.

13 SEZNAM LITERATURY

- [1] DROCHYTKA, R. *Pórobeton*. vyd. 1. Brno: VUTIUM, 1999, 157 s. ISBN 80- 214-1476-6.
- [2] SVOBODA, L. *Stavební hmoty*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004, 472 s. ISBN 80-8076-007-1.
- [3] KOHOUTKOVÁ. A., TRTÍK. K., VAŠKOVÁ. J., VODIČKA. J.: *Betonové konstrukce I*. 1. vydání. ČVUT Praha 2005, 178 s.
- [4] HLAVÁČ, J. *Základy technologie silikátů: celostátní vysokoškolská příručka pro studenty oboru 27-06-8 Technologie silikátů*. 2. upr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 517 s.
- [5] KNĚZEK, J. *Ekologické a ekonomické zpracování průmyslových odpadních materiálů*. 1. vyd. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, 2012. ISBN 978-80-87397-05-3.
- [6] MATOUŠEK, M. *Lehké stavební látky*. 3. opravené vyd. Brno: VUT, 1975, 130 s.
- [7] DROCHYTKA, R. *Lehké stavební látky*. Brno: Vysoké učení technické, 1993. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0514-7, 124 s.
- [8] VÝBORNÝ, J. *Nauka o materiálech 20 (21): pórobeton*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 8001020630.
- [9] TAKÁČ, J. *Expandovaný perlit: Výroba, vlastnosti a použití*. Bratislava: Alfa, 1988, 204 s.
- [10] MATOUŠEK, M. *Lehké stavební látky II*. 3. opr. vyd. Praha: SNTL, 1985, 130 s.
- [11] BAO, T., CHEN, T., WILLE, M-L., CHEN, D., BIAN, J., QING, CH., WU, W., FROST, R. L. Advanced wastewater treatment with autoclaved aerated concrete particles in biological aerated filters. *Journal of Water Process Engineering*. Volume 9, February 2016, Pages 188–194

- [12] BERGMANS, J., NIELSEN, P., SNELLINGS, R., BROOS, K. Recycling of autoclaved aerated concrete in floor screeds: Sulfate leaching reduction by ettringite formation. *Construction and Building Materials*. Volume 111, 15 May 2016, Pages 9–14
- [13] ARAYAPRANEE, W., REMPEL, G. L. Autoclaved Aerated Concrete Waste (AACW): An Alternative Filler Material for the Natural Rubber Industry. *Polymer composites*. Volume 36, Issue 11 November 2015 Pages 2030–2041
- [14] BISCEGLIE, F., GIGANTE, E., BERGONZONI, M., Utilization of waste Autoclaved Aerated Concrete as lighting material in the structure of a green roof. *Construction and Building Materials*. Volume 69, 30 October 2014, Pages 351–361
- [15] ZAETANG, Y., WONGSA, A., SATA, W., CHINDAPRASIRT, P. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials* Volume 48, November 2013, Pages 585–591
- [16] POSI, P., TEERACHANWIT, CH., TANUTONG, CH., LIMKAMOLTIP, S., LERTNIMOOLCHAI, S., SATA, V., CHINDAPRASIRT, P. Lightweight geopolymer concrete containing aggregate from recycle lightweight block. *Materials & Design*. Volume 52, December 2013, Pages 580–586
- [17] LACH, V., DAŇKOVÁ, M.: *Mikrostruktura stavebních látek*, Nakladatelství VUT Brno, 1991.
- [18] FLEISCHHACKER, J. *Vliv technologie výroby popílkového pórobetonu na vznik tobermoritických fází*. Brno, 2015/2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav DROCHYTKA, CSc., MBA
- [19] JARSKÝ, Č. *Příprava a realizace staveb*. Brno: CERM, 2003. Technologie staveb. ISBN 8072042823.
- [20] *Agloporit* [online] [cit. 2017-26-01] Dostupné z: <http://agloporit.cz/lehke-umele-kamenivo/>
- [21] *Keramzit* [online] [cit. 2017-26-01] Dostupné z: <http://www.keramzit.cz/co-je-keramzit/>

[22] *Liapor* [online] [cit. 2017-26-01] Dostupné z: <http://obchod.liapor.cz/keramicke-kamenivo-keramzit-liapor-4-8-mm-50-l>

[23] *Dřevo a stavby* [online] [cit. 2017-01-02] Dostupné z: <http://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/izolace/2238-perlit-je-darem-prirody>

[24] *Mechanizace zdemar* [online] [cit. 2017-01-02] Dostupné z: <http://www.mechanizace-zdemar.cz/prodej-stavebniho-materialu/#closed>

[25] *Kamena* [online] [cit. 2017-01-02] Dostupné z: <http://www.kamena.cz/50221-cihelna-drt/129222-cihelna-drt-balena-frakce-c-3-5/>

14 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Schéma postupu přípravy teoretické části.....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2 Grafické znázornění fází technologie autoklávování (změny tlaku) [1].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3 Grafické znázornění technologie autoklávování (změny teploty) [1].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4 Rovnice vzniku tobermoritu [1].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5 Fázový diagram CaO – SiO₂ – H₂O dle Besseye [1].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 6 Vztah mezi měrným povrchem hydratačních produktů a dobou hydrotermální reakce [1].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 7 Řez zrnem agloporitu [20].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 8 Agloporit frakce 8/16 [20].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 9 Řez zrnem keramzitu [21].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 10 Liapor frakce 4/8 [22].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 11 Perlit jako kámen, drcený a následně expandovaný [23].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 12 Expandovaný perlit [23].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 13 Cihlový recyklát [24].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 14 Cihelná drť frakce 2-11 mm [25].....</i>	<i>29</i>

Obr. 15 SEM obrázek vnějších povrchů pórobetonu a keramzitu před a po mikrobiálním zatížení [11].	31
Obr. 16 Matrice podlahového potěru se zrny pórobetonového kameniva a uzavřenými krystaly sádrovce [12].	32
Obr. 17 Vylouhování síry z podlahové mazaniny (po 7 dnech) s čistým pórobetonovým kamenivem jako funkce pH k výluhu (poměr voda/pevná fáze, L/S = 10). [12].	33
Obr. 18 Modelová reakce sádry a síranu s Ca a koncentrace síranu ve výluhu z podlahového potěru s CEM I (L/S = 10) [12].	33
Obr. 19 SEM analýza různých plniv [13]	35
Obr. 20 SEM analýza povrchu zlomeného tahem, před tepelným stárnutím [13].	36
Obr. 21 Pórobetonový odpad frakce 0,5 – 1 mm. [14].	37
Obr. 22 Pórobetonový odpad frakce 3 – 10 mm. [14].	37
Obr. 23 Druhy použitého lehkého kameniva [15].	38
Obr. 24 SEM snímek povrchů použitých lehkých kameniv (zvětšení 100 x) [15].	38
Obr. 25 Pevnost v tlaku a koeficient vodní propustnosti pro propustný beton s lehkým kamenivem. [15].	39
Obr. 26 Hustota a celkový poměr dutin v propustném betonu s lehkým kamenivem. [15].	39
Obr. 27 Součinitel tepelné vodivosti a hustota propustného betonu s lehkým kamenivem [15].	39
Obr. 28 Koeficient vodní propustnosti a celkový poměr dutin v propustném betonu s lehkým kamenivem. [15].	39
Obr. 29 Hrubé, střední a jemné recyklované kamenivo [16].	40
Obr. 30 Pevnost v tlaku a hustota lehkého geopolymerního betonu po 28 dnech v závislosti na poměru kapalné zásady/ popílku. [16]	41
Obr. 31 Pevnost v tlaku a hustota lehkého geopolymerního betonu po 28 dnech v závislosti na koncentraci NaOH. [16].	41

<i>Obr. 32 Pevnost v tlaku a hustota lehkého geopolymerního betonu po 28 dnech v závislosti na teplotě zrání. [16].</i>	42
<i>Obr. 33 Pevnost v tlaku a hustota lehkého geopolymerního betonu po 28 dnech v závislosti na poměru kamenivo/popílek. [16].</i>	42
<i>Obr. 34 Autoklávovací kapsle [9].</i>	48
<i>Obr. 35 Laboratorní školní lis (v levé části obrázku), úložné destičky (v pravé části obrázku).</i>	48
<i>Obr. 36 XRD PANalatical Empyrean, Cu – katoda $\lambda = 1,540598$ pro záření $K\alpha_1$ [18]</i>	49
<i>Obr. 37 SEM Tescan MIRA3 XMU od firmy TESCAN [18].</i>	50
<i>Obr. 38 SEM snímky pórobetonové drti frakce 0-2 mm před autoklávováním a po autoklávování 12 hodin při teplotě 190 °C.</i>	67
<i>Obr. 39 SEM snímky kompozitů s fluidním popínkem. S odlišným množstvím a granulometrií pórobetonové drtě. Autoklávovaných 12 hodin při teplotě 190 °C.</i>	68
<i>Obr. 40 SEM snímky kompozitů bez fluidního popínku. S odlišným množstvím a granulometrií pórobetonové drtě. Autoklávovaných 12 hodin při teplotě 190 °C.</i>	69

15 SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Rozdělení betonů podle objemové hmotnosti a jejich použití [3].</i>	13
<i>Tab. 2 Požadavky na vápno vhodné pro výrobu pórobetonu [1].</i>	14
<i>Tab. 3 Požadavky na křemičitý písek pro výrobu pórobetonu [1].</i>	15
<i>Tab. 4 Požadavky na popílek pro výrobu pórobetonu [1].</i>	16
<i>Tab. 5 Požadavky na Al - prášek pro výrobu pórobetonu [1].</i>	17
<i>Tab. 6 Požadavky na agloporit [7].</i>	25
<i>Tab. 7 Požadavky na keramzit [7].</i>	26
<i>Tab. 8 Požadavky na Perlit [7, 9].</i>	28
<i>Tab. 9 Požadavky na cihelnou drť a cihloporit [7].</i>	29

<i>Tab. 10 Vlastnosti použitých materiálů [11].....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 11 Průměrné hodnoty biologického provzdušňovacího filtru po odstranění pórobetonu a keramzitu v rozdílných HRTs [11].....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 12 Složky použité ve studii [13].....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 13 Fyzikální vlastnosti plniv [13].....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 14 Fyzikální vlastnosti materiálů [16]</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 15 Fyzikálně-mechanické vlastnosti drtě různé granulometrie</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 16 Srovnání vybraných výsledků pórobetonové drtě s komerčními kamenivý</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 17 Chemické složení vstupních surovin</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 18 Procentuální zastoupení jednotlivých surovin v záměs</i>	<i>55</i>

16 SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 Křivka zrnitosti pórobetonové drti frakce 0-2 mm</i>	<i>51</i>
<i>Graf 2 Objemových hmotností vzniklých procesem autoklávování, vzorky s příměsí fluidu.....</i>	<i>57</i>
<i>Graf 3 Posouzení objemových hmotností vzniklých procesem autoklávování vzorky bez příměsí fluidu</i>	<i>58</i>
<i>Graf 4 Závislost objemové hmotnosti na množství drti</i>	<i>59</i>
<i>Graf 5 Závislost pevnosti na množství drti.....</i>	<i>60</i>

17 SEZNAM RENTGENOGRAMŮ

<i>XRD 1 Drť frakce 0-2 mm.....</i>	<i>52</i>
<i>XRD 2 Rentgenogram pórobetonové drti autoklávované (černá) a neautoklávované (modrá). Vyznačení minerálů</i>	<i>61</i>
<i>XRD 3 Přiblížený rentgenogram píku xonotlitu.....</i>	<i>61</i>
<i>XRD 4 Přiblížený rentgenogram píku tobermoritu</i>	<i>62</i>

<i>XRD 5 Kombinace rentgenogramů vzorků s fluidním popínkem autoklávovaných při teplotě 190 °C.....</i>	<i>62</i>
<i>XRD 6 Kombinace rentgenogramů vzorků s fluidním popínkem autoklávovaných při teplotě 190 °C, přiblížení oblasti výskytu xonotlitu.....</i>	<i>63</i>
<i>XRD 7 Kombinace rentgenogramů vzorků s fluidním popínkem autoklávovaných při teplotě 190 °C, přiblížení oblasti výskytu tobermoritu</i>	<i>64</i>
<i>XRD 8 – Kombinace rentgenogramů vzorků bez fluidního popínku autoklávovaných při teplotě 190 °C.....</i>	<i>65</i>
<i>XRD 9 Kombinace rentgenogramů vzorků bez fluidního popínku autoklávovaných při teplotě 190 °C, přiblížení oblasti výskytu xonotlitu.....</i>	<i>65</i>
<i>XRD 10 Kombinace rentgenogramů vzorků bez fluidního popínku autoklávovaných při teplotě 190 °C, přiblížení oblasti výskytu tobermoritu</i>	<i>66</i>

18 SEZNAM ZKRATEK

Skratka	Název česky	Název anglicky
C/S	molární poměr CaO/SiO ₂	
XRD	rentgenová difrakční analýza (RTG)	x-ray diffraction
SEM/REM	skenovací/rastrovací elektronová mikroskopie	scanning/reflection electron microscope
CSH	kalciumpydroxysilikáty	Calciumsilicatehydrates
F	vzorek s příměsí fluidního popínku	
V	vzorek na bázi vápna	
Fxx	vzorek s příměsí fluidního popínku a pórabetonové drti o xx% podílu	
Vxx	vzorek na bázi vápna s příměsí pórabetonové drti o xx% podílu	